

**Das Quellverhalten von Alkalisilikatgelen unter Beachtung  
ihrer Zusammensetzung**

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor – Ingenieur

An der Fakultät Bauingenieurwesen  
der Bauhaus-Universität Weimar

vorgelegt von  
Thomas Mansfeld

Gutachter: 1. Prof.Dr.-Ing.habil. J. Stark

2. Priv.-Doz. Dr. rer. nat., Dr.-Ing. habil. K.-J. Hüniger

3. Prof. Dr.-Ing. H.-W. Reinhardt

Die öffentliche Disputation fand am 04.12.2008 in Weimar statt.

## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde der Bauhaus-Universität Weimar.

Herzlich bedanken möchte ich mich bei Prof. Dr.-Ing. habil. J. Stark für die Möglichkeit der Durchführung und die Unterstützung bei der Erarbeitung der vorliegenden Dissertation.

Für die stets freundliche Hilfe bei allen Untersuchungen, die zahlreichen Fachgespräche und das sehr angenehme Arbeitsklima möchte ich mich bei allen Mitarbeitern des F. A. Finger-Instituts bedanken.

Besonderer Dank gilt meiner Familie, die mir stets zur Seite gestanden hat und speziell meiner lieben Frau für ihre Geduld und Unterstützung.

Weimar, Mai 2008

Thomas Mansfeld

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Problemstellungen und Lösungsansatz</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>Allgemeines zur Alkali-Kieselsäure-Reaktion</b>	<b>6</b>
	3.1 Grundlagen und aktueller Wissensstand zum Ablauf der AKR	6
	3.2 AKR-Prüfverfahren	15
	3.3 Expansionsdrücke und Expansionsdruckmessungen	19
	3.4 Entstehung und Besonderheiten von Alkali-Kieselsäure-Gelen	34
	3.5 mathematische Modelle und Computersimulation	37
	3.6 Zusammenfassung und offene Fragen	39
<b>4</b>	<b>Untersuchungen zur Struktur und Zusammensetzung von AK-Gelen in Mörtel- und Betonproben</b>	<b>40</b>
	4.1 Mörtelproben im Mörtelschnelltest (Magdeburger Schnelltest)	40
	4.2 Betonproben im Vergleich Nebelkammer / Klimakammer / Außenlagerung	53
	4.3 Auswertung/Zusammenfassung	57
<b>5</b>	<b>Quellversuche</b>	<b>59</b>
	5.1 Entwurf und Entwicklung der Quellformen	59
	5.2 Probenherstellung und Vorbereitung	66
	5.3 Vorversuche zur Quellmaß- und Quelldruckbestimmung	72
	5.4 Quellmaß und Quelldruckbestimmungen	75
	5.5 Auswertung und Zusammenfassung	82
<b>6</b>	<b>Bestimmung ausgewählter Materialparameter von Gesteinskörnungen Mörtelmatrix</b>	<b>98</b>
	6.1 Zugfestigkeit von Gesteinskörnungen	98
	6.2 Bestimmung des erforderlichen inneren Druckes für die Erzeugung von Rissen im Betongefüge	100
<b>7</b>	<b>Untersuchungen zur Geschwindigkeit der Alkali-Kieselsäure-Reaktion</b>	<b>111</b>
	7.1 Reaktionsgeschwindigkeit zwischen Alkaliwassergläsern und Portlandit	111
	7.2 Bestimmung der Löslichkeit von Kieselsäure- und Aluminiumverbindungen ausgewählter Gesteine in Natronlauge	114
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>118</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>120</b>
	<b>Anhang</b>	<b>A1</b>

## Abkürzungsverzeichnis

<b>AAR</b>	engl.: alkali-aggregate-reaction
<b>Abk.</b>	Abkürzung
<b>AKR</b>	Alkali-Kieselsäure-Reaktion
<b>ASR</b>	engl.: alkali-silica-reaction
<b>AZR</b>	Alkali-Zuschlag-Reaktion
<b>A-S-H</b>	Alkali-Silikat-Hydrat (– Phase)
<b>BZ</b>	Biegezugfestigkeit
<b>chem.</b>	chemisch(e)
<b>C-A-S-H</b>	Calcium-Alkali-Silikat-Hydrat (– Phase)
<b>C-N-S-H</b>	Calcium-Natrium-Silikat-Hydrat (– Phase)
<b>FA</b>	Flugasche(n)
<b>GGW</b>	Gleichgewicht
<b>HÜS</b>	Hüttensand
<b>ICAAR</b>	International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete
<b>NB</b>	Nachbehandlung
<b>NK</b>	Nebelkammer
<b>KK</b>	Klimakammer
<b>N-S-H</b>	Natrium-Silikat-Hydrat (– Phase)
<b>OFZ</b>	Oberflächenzugfestigkeit
<b>o.g.</b>	oben genannt(e)
<b>u.g.</b>	unten genannt(e)
<b>RDM</b>	relativer dynamischer E-Modul
<b>r.F.</b>	relative (Luft-)Feuchte
<b>RiLi</b>	Richtlinie
<b>SFA</b>	Steinkohlenflugasche
<b>s.o.</b>	siehe oben
<b>s.u.</b>	siehe unten
<b>SZ</b>	Spaltzugfestigkeit
<b>Tab.</b>	Tabelle
<b>teilw.</b>	teilweise(r)

# 1 Einleitung

Erste Forschungen nach Ursachen und Gegenmaßnahmen auf dem Gebiet der Alkali-Kieselsäure-Reaktion begannen in den zwanziger Jahren des 20. Jahrhunderts. Nach zahlreichen Schäden an Betonbauwerken in den USA, wie Betonstraßen oder Staudämmen, fand T.A. Stanton die Ursache in einer Reaktion zwischen den Alkalien des Zementes und dem verwendeten opalhaltigen Gesteinskorn. Stanton veröffentlichte 1940 erstmals Ergebnisse über die „alkali-aggregate reaction“ in den „Proceedings of the American Society of Civil Engineering“ [69].

Nach dem Auftreten der AKR rund um den Globus in den 50er Jahren des vorigen Jahrhunderts wurde diese Reaktion in Deutschland Ende der 60er Jahre als Ursache für Schäden an verschiedenen Bauwerken festgestellt. In der ehemaligen DDR traten Schäden infolge der AKR zu Anfang der 80er Jahre in Mecklenburg und später in Sachsen und Thüringen auf. Insbesondere verursachte die AKR in Kombination mit einer späten Ettringitbildung Milliarden Schäden bei Betonschwellen der Deutschen Reichsbahn [69]. Weitere Schäden vor allem an Brückenbauwerken und Fahrbahndecken führten dazu, dass der DAfStb 1973 erstmals eine vorläufige Richtlinie „Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkaliwirkung im Beton“ herausgab, deren Anwendungsbereich sich mit der Wiedervereinigung Deutschlands erheblich erweiterte. Zu den anfänglich als reaktiv geltenden Gesteinskörnern Opalsandstein und Flint wurden weitere alkaliempfindliche Gesteinsarten wie z.B. die Lausitzer Grauwacken in das Regelwerk aufgenommen. Andere alkaliempfindliche Gesteinskörner wurden in der Richtlinie nicht speziell genannt, sondern es wird nur darauf verwiesen, bei Verdacht auf Alkaliempfindlichkeit eine Prüfung nach Teil 3 der Richtlinie durchzuführen [14].

Die Prüfung der Alkaliempfindlichkeit von Gesteinskörnern ist nach der Richtlinie eine zeitintensive Angelegenheit, wobei die Ergebnisse dazu noch schwer zu bewerten sind [14]. Für eine verbesserte Bewertung dieser Ergebnisse und der alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen speziell, dienen petrographische Untersuchungen wie sie in [14, 18]



*Abbildung 1: typisches äußeres Erscheinungsbild AKR-geschädigter Betone, Risse infolge von Treiberscheinungen*

beschrieben werden. Dennoch ist es auch mit der derzeit noch gültigen Fassung der RiLi vom Mai 2001 nicht gelungen und es wird auch mit der ab 2008 gültigen Fassung der RiLi von Februar 2007 nicht gelingen, flächendeckend AKR-Schäden zu vermeiden, da sehr viele regionale Gesteinskörnungen nicht oder nur teilweise in das Regelwerk eingebunden sind und noch immer ein erheblicher Forschungsbedarf auf dem Gebiet der Alkali-Kieselsäure-Reaktion besteht. Als aktuelles Beispiel können erstmals 1997/98 aufgetretene Alkalischäden an Betonfahrbahndecken in den Gebieten des Oberrheins genannt werden, wobei sich bis dahin als nicht bzw. kaum reaktiv eingestuftes gebrochenes Oberrheinmaterial als Ursache herausstellte. Weitere Forschungsdefizite bestehen u.a. auch bei den durch die Reaktion von

Alkalihydroxiden (NaOH, KOH) aus der Zementsteinporenlösung bzw. von Taumitteln mit dem amorphen bzw. teilkristallinen  $\text{SiO}_2$  reaktiver Gesteinskörnungen entstehenden expansionsfähigen Gelen. Hier gibt es noch immer Unklarheiten bezüglich der genauen Schädigungsmechanismen, der Zusammensetzungen und Viskositäten sowie des Expansionsverhaltens. So zeigten z. B. erste Quelluntersuchungen am FIB Weimar an synthetisch hergestellten AK-Gelen, dass die entstandenen Drücke infolge von reinen Quellvorgängen nicht die Zugfestigkeiten verschiedener getesteter Gesteine erreichten und auch die Zugfestigkeiten konventioneller Betone nicht erreicht wurden. Dennoch wurde bei den Analysen zahlreicher Dünnschliffe von AKR geschädigten Betonen kein Fall bekannt, bei dem es nicht zu einem Aufplatzen einzelner Gesteinskörner zumeist mit einer Rissfortsetzung bis in die Betonmatrix kam [18, 19].

Die hier vorliegende Arbeit soll im ersten Teil neben wichtigen Grundlagen zur Alkali-Kieselsäure-Reaktion den aktuellen Wissensstand zu den Themen „Expansionsdrücke von AK-Gelen“ und „Expansionsdruckmessungen“ wiedergeben. Im zweiten Teil werden Untersuchungen zur Zusammensetzung und der Struktur von Alkali-Kieselsäure-Gelen in geschädigten Mörteln und Betonen vorgestellt. Der dritte Teil zeigt verschiedene Ansätze zur Bestimmung von Quelldrücken und Quellmaßen und diskutiert die gewonnenen Ergebnisse hinsichtlich ihrer Aussagefähigkeit. Im letzten Teil erfolgt eine Verifizierung der Ergebnisse und Schlussfolgerungen anhand klassischer Untersuchungen zur Zusammensetzung und Struktur der synthetischen Alkalisilikatgele und an zum Teil neu entwickelten Prüfmethode zur Bestimmung notwendiger gefügezerstörender (Gel-)Drücke.

## 2 Problemstellungen und Lösungsansatz

In den folgenden Punkten soll kurz die Motivation für diese Arbeit erläutert werden. Durch die Komplexität der Alkali-Kieselsäure-Reaktion sind trotz weltweiter, intensiver Forschungstätigkeiten noch viele Fragen ungeklärt. Hier sollen die wichtigsten Punkte aufgeführt werden:

- Der Mechanismus und die Entstehung des zerstörenden Druckes einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion sind trotz umfangreicher Forschungsarbeit bis heute ungeklärt
- Welcher Vorgang zerstört die Gesteinskörner bzw. das Betongefüge?
- Können Quellspannungen durch Wasseraufnahme die Schadensursache sein?
- Hat in den Gelen enthaltenes Calcium einen entscheidenden Einfluss auf deren Quellvermögen?
- Welche Druckspannungen werden bei der Reaktion im Gefüge erreicht?
- Welche Druckspannungen sind nötig, um das Betongefüge aufzureißen?

Diese Arbeit soll hauptsächlich durch die Herstellung synthetischer AK-Gele und die Bestimmung ihres Quellverhaltens zur Klärung der oben genannten Fragen beitragen. Die Herstellung der synthetischen AK-Gele basiert auf mehreren Verfahren, dem Zusammenschmelzen von Alkalicarbonaten, Calciumhydroxid und Kieselsäure, der Verwendung handelsüblicher Wassergläser und der Synthese von Alkalisilikatgelen aus Lösungen. Das Quellverhalten dieser synthetischen Gele soll in Abhängigkeit ihrer chemischen Zusammensetzung beschrieben werden.

Somit sollte es möglich sein, Rückschlüsse auf den Mechanismus und die Einflüsse auf eine Alkali-Kieselsäure-Reaktion zu ziehen.

### 3 Allgemeines zur Alkali-Kieselsäure-Reaktion

#### 3.1 Grundlagen und aktueller Wissensstand zum Ablauf der AKR

Im Allgemeinen wird in der Literatur zwischen drei Alkali-Zuschlag-Reaktionen (engl. **AAR**) unterschieden:

- Alkali-Silika-Reaktion (engl. **ASR**):
- Alkali-Silikat-Reaktion und
- Alkali-Carbonat-Reaktion (engl. **alcali-carbonate reaction**)

Die Alkali-Silika-Reaktion wird im deutschen Sprachraum als Alkali-Kieselsäure-Reaktion (**AKR**) bezeichnet und bezieht sich damit auf die Reaktion zwischen amorpher bzw. schlecht kristalliner Kieselsäure und einem Alkalihydroxid zu einem Alkali-Kieselsäure-Gel.

Als Alkali-Silikat-Reaktion wird die Reaktion zwischen Alumosilikaten (speziell die leicht angreifbaren Silikate vom Schichtgittertyp [Phyllo-Silikate]) und Alkalihydroxid bezeichnet und es wird angenommen, dass der Reaktionsmechanismus ähnlich dem der AKR ist [27].

Die weitaus weniger bedeutende Alkali-Carbonat-Reaktion bzw. Alkali-Dolomit-Reaktion bezieht sich auf eine Reaktion zwischen einem Dolomit ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) mit Alkalihydroxiden zu Alkalicarbonaten, Kalkstein und Magnesiumhydroxid, der so genannten Dedolomitisierung. Diese Zersetzung des Dolomits führt nicht zu einer Treibreaktion. Stattdessen reagiert kryptokristalliner Quarz im Dolomit wie bei einer klassischen AKR. Nach Katayama – Sommer [31] ist demzufolge die Alkali-Karbonat-Reaktion nicht als AKR zu bezeichnen.

Durch Treiberscheinungen und daraus resultierende Entlastungsrisse, die sich ohne weiteres auch noch bis unter die Bewehrungslagen fortsetzen können, entsteht das typische äußere Schadensbild einer AKR (siehe Abb. 3.1.1 und Abb. 3.1.2). Aufgrund dieser deutlich erkennbaren netzartigen Rissausbildung spricht man hier vom „map-cracking“. Weiterhin sind stellenweise Auswachsungen an der Oberfläche sowie trichterförmige Abplatzungen (eng.: „popouts“) möglich. Ursache dafür sind mit den Alkalien aus der Porenlösung des Betons reagierende kieselsäurehaltige Gesteinskörner, die sich direkt unter der äußeren Zementhaut befinden [41]. Ebenfalls typisch sind Gelaus-

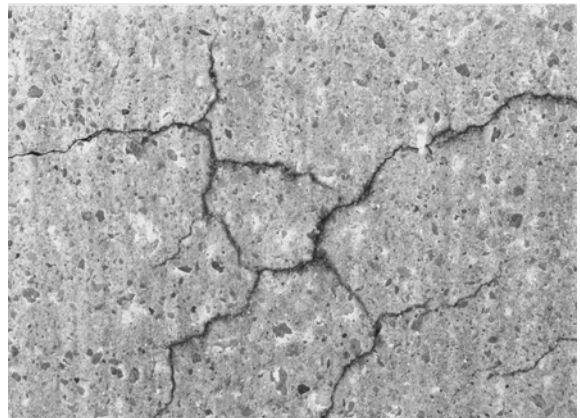


Abbildung 3.3.1: netzartiges Rissmuster bei AKR-geschädigten Betonen



Abbildung 3.1.2: karbonatisiertes Alkali-Kieselsäure-Gel in Luftporen nach einer NK-Lagerung (Quelle: [40] S. 94])



scheidungen an der Oberfläche und in vorhandenen Luftporen. Dieses AK-Gel wird anfänglich in Form von klaren dickflüssigen Tropfen (Abb. 3.1.3) erkennbar und reagiert später mit dem CO<sub>2</sub> der Luft zu einem leicht zu entfernenden weißen bis gräulichen Rückstand. Neben den hier beschriebenen makroskopischen Merkmalen, die dem Experten erste Anzeichen auf eine AKR liefern, gibt es weitere typische mikroskopische Erkennungszeichen. Hier sind zu nennen: gequollene und aufgeplatzte Gesteinskörner, Reaktionsränder um einzelne Steine und Mikrorisse im Gefüge, die erst bei genauerer Betrachtung unter dem Mikroskop sichtbar werden.



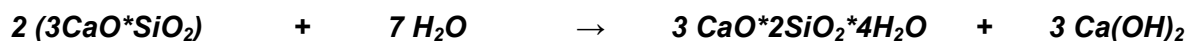
Abbildung 3.1.3 : massive Gelausscheidung an einer geschädigten Betondecke mit Opalsandstein (Quelle: [27] S. 8)

## Chemische Reaktionen der Alkali-Kieselsäure-Reaktion

Die „klassische“ **Alkali-Kieselsäure-Reaktion** (z. B. bei Opalsandstein und Flint) ist in Bezug auf ihre Schadens- und Reaktionsmechanismen weitestgehend geklärt und wird für die Erläuterung der grundlegenden Abläufe nachfolgend genauer betrachtet:

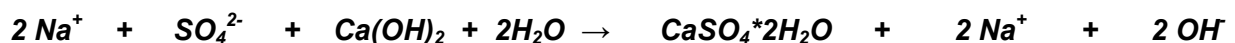
Alle Gesteinskörnungen, die amorphe, kryptokristalline oder gittergestörte SiO<sub>2</sub>-Minerale enthalten, können je nach ihrem regionalen Ursprung und ihrer Entstehungsgeschichte in Bezug auf eine AKR als besonders gefährdet gelten. Zu diesen zählen die Tektosilikate (Gerüstsilikate) Opal, Chalcedon, Cristobalit, Tridymit sowie kryptokristalline und tektonisch stark beanspruchte („gestresste“) Quarze [69], [27]. Mit den in der Porenlösung des Betons vorliegenden Alkalihydroxiden kann dieses reaktive SiO<sub>2</sub> zu einer betonschädigenden Reaktion führen. Am Beispiel des Natriums sollen nachfolgend die prinzipiell ablaufenden Prozesse näher erläutert werden.

### 1. Reaktion des Zementes mit Wasser:



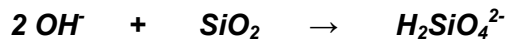
Die Hauptklinkerphasen des Zementes (hier beispielsweise Alit) reagieren nach Wasserzugabe zu C-S-H – Phasen und Calciumhydroxid (Portlandit), wobei gleichzeitig die hauptsächlich an Sulfat gebundenen Alkalien (Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>) in Lösung gehen.

### 2. Reaktion der Alkalisulfate mit Portlandit:



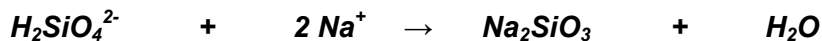
Es kommt zu einer Reaktion mit dem entstandenen Calciumhydroxid, so dass die Alkalien und die freigesetzten Hydroxidionen als Lauge in einer wässrigen Lösung vorliegen, während die Sulfationen für die Entstehung von schwer löslichen Calciumsulfaten (Gips) bzw. Ettringit verbraucht werden.

3. Reaktion der Hydroxidionen mit dem  $\text{SiO}_2$  der Gesteinskörnung:



Die Hydroxidionen, welche für einen starken pH-Wert – Anstieg (bis 13,9) in der Porenlösung des Betons verantwortlich sind, reagieren mit dem Siliciumdioxid der Gesteinskörnung zu Kieselsäureionen, indem Si-O-Si – Bindungen (Siloxanbrücken) aufgebrochen werden und -Si-OH – Bindungen (Silanolgruppen) gebildet werden.

4. Reaktion der Alkali-Ionen mit den Kieselsäureionen:



Die Kieselsäureionen können sich mit den vorliegenden Alkali-Ionen verbinden und ein Alkali-Silikat-Gel bilden, das sich bei ausreichend vorhandener Feuchtigkeit durch die Aufnahme von Wasser ausdehnt und damit Drücke im Gefüge produziert. Dies kann dann im Zusammenwirken mit anderen noch nicht vollständig geklärten Mechanismen zu dem AKR-typischen Aufplatzen innerhalb des Gesteinskorns mit einer Rissfortsetzung in die Betonmatrix führen.

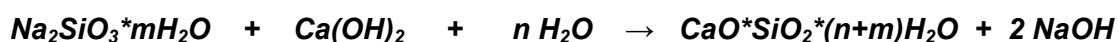
Zusammenfassend kann folgende Reaktionsgleichung formuliert werden:



(expansionsfähiges Gel mit vorwiegend amorphen Alkalisilikaten)

Ein besonders hohes Schädigungspotential besteht unter anderem deshalb, weil das gebildete Gel wiederum mit dem Portlandit (zu C-S-H – Phasen bzw. alkaliärmeren Gelen) reagieren kann und dadurch erneut Alkalihydroxide freigesetzt werden [69], [28].

5. weitergehende Reaktion mit Portlandit:



(Gel, dessen Expansionsfähigkeit vom Ca - Gehalt abhängt)

Folglich können sich Alkali-Ionen solange zu anderen Reaktionsfronten und tiefer ins Gestein bewegen wie  $\text{Ca(OH)}_2$  zur Verfügung steht.

## Einflussgrößen

Für eine betonschädigende Alkali-Kieselsäure-Reaktion müssen bestimmte Voraussetzungen erfüllt sein. Neben dem Haupteinflussfaktor, der Gesteinskörnung spielen auch die Zementart bzw. -zusammensetzung sowie Umgebungsbedingungen (Feuchte-/Temperaturverhältnisse), der Zementgehalt des Betons und dessen Gefügebildung (Permeabilität) und eine mögliche Alkalizufuhr von außen eine wichtige Rolle. Im Folgenden sollen nur ausgewählte Faktoren kurz erläutert werden, die für die hier durchgeführten Versuche relevant sind. Einen umfassenden Überblick über die Einflussfaktoren einer AKR gibt [68].

## Feuchtigkeit

Das Vorhandensein von ausreichender Feuchtigkeit im Beton (z. B. innerhalb massiger Bauteile) bzw. in der umgebenden Luft ist elementar für den Ablauf einer AKR. Das heißt für Betone in ständig trockener Umgebung sind Schäden infolge dieser Reaktion nicht zu erwarten. Die Porenlösung im Beton stellt das Diffusionsmedium dar, über das ein Materialaustausch der löslichen Stoffe im Gefüge erfolgt. Diese Feuchtigkeit ist damit Grundvoraussetzung für die Bildung von Alkalihydroxiden und deren Transport zu den reaktiven  $\text{SiO}_2$  – haltigen Gesteinskörnungen sowie die Expansion entstandener AK-Gele. Mit zunehmendem Feuchtigkeitsangebot (d. h. steigender rel. F.) wird nach bisherigen Erkenntnissen die schädigende Wirkung einer AKR verstärkt. Dabei gilt – auch stark abhängig von der Temperatur – eine relative Feuchte von ca. 80 % als Schwellenwert für die betonschädigende AKR [55]. Bei sehr hohen Luftfeuchten kann diesen Prozessen dann u. a. der Effekt einer Alkali-Auslaugung und somit der Entzug eines Reaktionspartners entgegenwirken (siehe Abb. 3.1.4 Kurve für 100% Luftfeuchte).

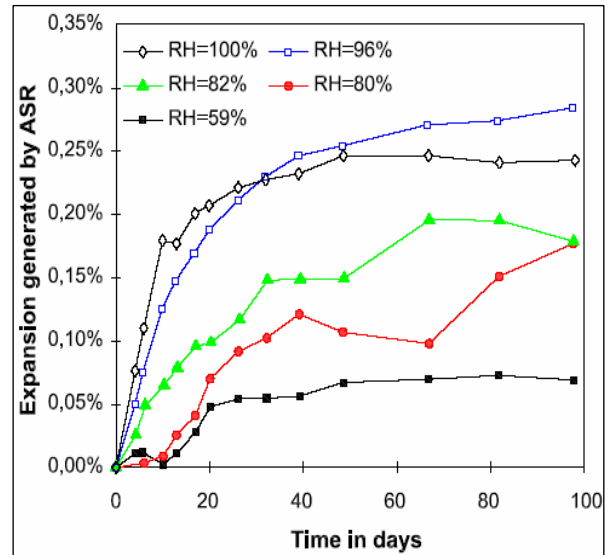


Abbildung 3.1.4: Dehnungen von Mörtelprismen infolge einer AKR bei unterschiedlichen rel. Luftfeuchten (Quelle: [53][55])

Ein ständiger Wechsel zwischen trockenen und feuchten Umgebungsbedingungen ist langfristig gesehen aufgrund eines verstärkten Feuchtetransportes und dem ständigen Durchlaufen der optimalen Quellbedingungen besonders günstig für die Dehnung und Rissbildung im Beton [27], [69].

Wie Untersuchungsergebnisse in [49] zeigen, kann der laufende Prozess einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion durch das Absenken der Luftfeuchtigkeit gestoppt werden. Dies unterstreicht die absolute Notwendigkeit für das Vorhandensein von Feuchtigkeit. Wiederum kann eine nachträgliche Feuchtezufuhr zu Dehnungserscheinungen führen, solange noch Reaktionspartner im Betongefüge vorhanden sind.

## Gesteinskörnung

Alle  $\text{SiO}_2$  enthaltenden Gesteinskörnungen reagieren grundsätzlich mit der Hydroxidlösung im Beton [1], [63], [69]. Intensität, Geschwindigkeit und damit das Schädigungspotential hängen dabei jedoch wesentlich vom Kristallzustand des  $\text{SiO}_2$  und der Hydroxidionen-Konzentration, d. h. vom pH-Wert der Porenlösung ab. Auch die Korngröße hat einen Einfluss auf die Reaktionsgeschwindigkeit einer AKR [63], [81]. EICKENBERG [17] bestimmte die in Abb. 3.1.5 dargestellten theoretischen Löslichkeitskurven von kristallinem und amorphem  $\text{SiO}_2$  in Abhängigkeit des pH-Wertes. Praktische Versuche im Rahmen eines DFG-Forschungsprojektes bestätigen diesen Anstieg, wobei aber nachgewiesen wurde, dass für kristallines  $\text{SiO}_2$  die tatsächliche Grenze der Löslichkeit 0,2 g/l beträgt [67]. Das heißt, grobkristalliner Quarz wird lediglich in geringem Maße angelöst, was sogar den Verbund mit der Betonmatrix fördert [63], und nur Gesteinskörnungen mit hohen Anteilen schlecht

kristallisierter Kieselsäure können zu Betonschädigungen und der Bildung größerer Alkalisilikat-Gel – Mengen führen. Eine wesentliche Ursache liegt im Kristallgitteraufbau der unterschiedlichen  $\text{SiO}_2$  – Modifikationen. Reiner gutkristalliner Quarz (Bergkristall) weist eine Tetraederstruktur auf, wobei sich in der Mitte eines Tetraeders das Si – Atom befindet und darum vier O – Atome (zwei eigene und zwei aus benachbarten Tetraedern) angeordnet sind. Durch diese sehr starke Verbindung der Tetraeder untereinander wird der Quarz durch (Alkali-) Hydroxidlösungen kaum angegriffen. Treten jedoch bei ihrer Genese hohen Drücken und/oder hohen Temperaturen ausgesetzte Modifikationen wie beispielsweise Cristobalit oder Tridymit auf, ist die Löslichkeit infolge von Unregelmäßigkeiten bzw. enthaltenen Fehlstellen wesentlich höher. Gleiches gilt für den Quarz, wenn dieser als Mikroquarz Gefügeunstetigkeiten enthält oder metamorph stark beansprucht wurde („gestresster Quarz“). Außerdem können bei einigen Mineralen wie z.B. Opal und Chalcedon die Si-O-Si – Brücken durch den Einbau von Hydroxidgruppen gestört sein. Da die  $\text{OH}^-$  – Gruppen keine direkte Bindung zu anderen Teilen der Struktur

eingehen, ist diese weniger dicht und es müssen insgesamt weniger Si-O-Si – Brücken gebrochen werden, um Auflösungserscheinungen im Gefüge hervorzurufen. Als „gefährdet“ einzustufen sind im Allgemeinen alle diejenigen Gesteinskörnungen, welche reaktives  $\text{SiO}_2$  in mindestens einer der hier beschriebenen Formen enthalten. In unseren Regionen (d. h. innerhalb Deutschlands) sind das hauptsächlich:

1. Opalsandstein (Opal, Cristobalit)
2. Kieselkreide, Kieselkalke (Chalcedon, kryptokristalliner Quarz)
3. Flint (Chalcedon, kryptokristalliner Quarz)
4. Kieselschiefer (Chalcedon, kryptokristalliner Quarz)
5. Grauwacken (kryptokristalliner und gestresster Quarz, Chalcedon)
6. stark bruchtektonisch beanspruchte Granite (kryptokristalliner Quarz)
7. Rhyolithe (kryptokristalliner Quarz)

Ebenfalls als reaktiv und problematisch hinsichtlich einer möglichen AKR haben sich Quarzite, Phyllite, Andesite und Tonschiefer herausgestellt. Schäden konnten hier bereits bei sehr geringen Anteilen von amorphem oder kryptokristallinem  $\text{SiO}_2$  festgestellt werden. Teilweise wurde auch Glimmer als Ursache genannt [69].

Auch bei Verwendung technischer Produkte als Zuschlag kann AKR-Gefahr auftreten. Beispiele hierfür sind:

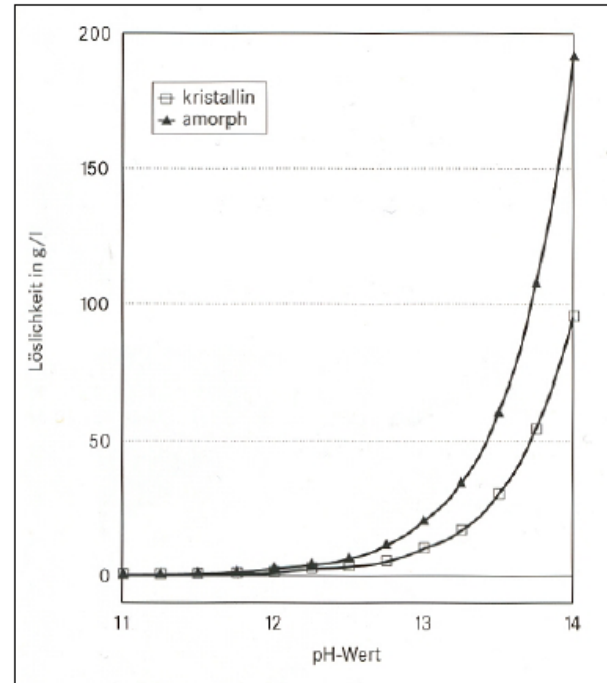


Abbildung 3.1.5: theoretische pH-Wert - abhängige Löslichkeit von amorphem und kristallinem  $\text{SiO}_2$  nach EICKENBERG (bei 25°C) [17]

1. Siliciumcarbid als Hartstoff (hohe Cristobalitgehalte, wenn Recyclingmaterial aus der Feinkeramik)
2. Bau- oder Duranglase (Duranglas wird daher als Standardzuschlag für AKR-Prüfung verwendet)

### **Zement**

Da der hauptsächliche Anteil der Alkalien aus dem verwendeten Zement stammt, sind dessen Zusammensetzung und die Zugabemenge im Beton von entscheidender Bedeutung für die mögliche schädigende Wirkung einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion.

Maßgeblich abhängig von Art und prozentualer Verteilung der Zementhauptbestandteile sind der Gesamtalkaligehalt, die Kinetik und der Mechanismus der Freisetzung der Alkalien sowie deren Einbindung in Reaktionsprodukte [57], [69]. D. h., die Form der Alkalienbindung und damit die Fähigkeit bei ausreichend vorhandener Feuchte schädliche Alkalihydroxide bilden zu können, entscheidet unmittelbar über die Eignung eines Zementes im Zusammenhang mit empfindlichen Gesteinskörnungen. Alkalien können im Zement folgendermaßen gebunden vorliegen:

sulfatisch (Alkalisulfate) → sofort im Anmachwasser löslich

in Klinkerminerale eingebaut → Freisetzung erfolgt langsam mit fortschreitender Hydratation

in Zusatzstoffen → sehr langsames, nicht vollständiges Inlösungsgehen

Allgemein wird davon ausgegangen, dass im normalen Portlandzement der Gesamtalkaligehalt in etwa dem wirksamen Alkaligehalt entspricht [52]. Da nach [57] im Portlandzementklinker i. d. R. aber nur zwischen 60 % und 80 % der Alkalien in Form von sofort löslichen Alkalisulfaten vorliegen, entspricht das eher dem wirksamen für eine AKR mobilisierbaren Alkaligehalt eines Portlandzementes (ca. 75 % [58]). Zwar werden bei fortschreitender Hydratation weitere Alkalien aus den Klinkermineralen freigesetzt, parallel dazu aber auch Alkalien in entstehende Reaktionsprodukte eingebaut bzw. an diese angelagert. So können z. B. nach [59] die C-S-H – Phasen abhängig von ihrer stöchiometrischen Zusammensetzung und den eingebauten Fremdionen (z. B. Aluminium) Alkalien binden.

Zemente, bei denen der Portlandzementklinker teilweise durch SFA oder HÜS ausgetauscht wurde, weisen erfahrungsgemäß geringere wirksame Alkaligehalte als gewöhnliche Portlandzemente auf. Dies ist auf die insgesamt reduzierte Menge an Alkalisulfaten, die bessere Einbindung und damit verzögerte Löslichkeit der Alkalien in den Zusatzstoffen sowie die gesteigerte Bindungskapazität der entstehenden kalkärmeren C-S-H – Phasen zurückzuführen [2], [7], [23], [25], [59]. Die Untersuchungen von [59] zeigten ebenfalls, dass sich mit wachsendem Alkaliangebot auch die Alkalität der Porenlösung erhöht und dabei gleichzeitig die Menge der gebundenen Alkalien steigt. Erklärt wird dieses Phänomen mit der Ausbildung eines Gleichgewichtes zwischen den C-S-H – Phasen und der Porenlösung. Geeignete Zemente (Tab. 3.1.1), die die Gefahr einer betonschädigenden AKR minimieren bzw. ausschließen sollen, sind in der nationalen Norm DIN 1164-10 für Zemente mit besonderen Eigenschaften aufgeführt (Kennzeichnung: NA). Als Kriterium gilt hier allerdings der Gesamtalkaligehalt des Zementes, unter anderem deshalb, weil sich die Bestimmung des wirksamen Alkaligehaltes als relativ schwierig und aufwendig erweist. Die beiden dafür



angewandten Verfahren sind das Auspressen der Porenlösung (Untersuchungsergebnisse zum Einfluss des Auspressdruckes auf die ermittelte Alkalienkonzentration werden in [4]

Tabelle 3.1.1: Grenzwerte für das  $\text{Na}_2\text{O}$  - Äquivalent genormter NA-Zemente

	Hüttensandgehalt in M-%	$\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalent in M-%
CEM I bis CEM V		$\leq 0,60$
CEM II/B-S	21 bis 35	$\leq 0,70$
CEM III/A	36 bis 49	$\leq 0,95$
	50 bis 65	$\leq 1,10$
CEM III/B	66 bis 80	$\leq 2,00$
CEM III/C	81 bis 95	$\leq 2,00$

dargestellt.) und das Lösungsverfahren nach FELDRAPPE (siehe dazu [64]). Genauer werden diese Verfahren in [68] erläutert.

Das  $\text{Na}_2\text{O}$  – Äquivalent gewöhnlicher PZ liegt hierzulande i. d. R. deutlich unter 1,3 M-%. Aufgrund langfristiger Bauwerksbeobachtungen und experimenteller Befunde wurden für die in Deutschland zugelassenen genormten NA-Zemente die in Tabelle 3.1.1 kritischen Obergrenzen für  $\bar{N}$  festgelegt.

Da die Grenzwerte prozentual bezogen auf den Zement angegeben werden, ist auch dessen Zugabemenge im Beton von Bedeutung. Über die Senkung des Zementgehaltes ist es demnach möglich, die Alkalimenge im Beton zu reduzieren bzw. kann auch bei der Verwendung eines NA-Zementes ein kritischer Alkaliengehalt erreicht werden. Für opalhaltige Gesteinskörnungen liegt der Grenzwert bei  $3 \text{ kg/m}^3$  [41] und nach [51] liegt der kritische Alkaligehalt für eine dort untersuchte Grauwacke bei  $2 \text{ kg/m}^3$  Alkalien im Beton. Dieser Wert ist also stark von der verwendeten Gesteinskörnung abhängig.

### **Alkalizufuhr von Außen**

Zusätzlich zu dem Anteil an Alkalien, welcher über den Zement eingebracht wird, kann im Beton auch eine Alkalizufuhr „von Außen“ erfolgen. Diese Zufuhr von Außen ist über alkalihaltige Salze, welche in Form von Auftaumitteln eingetragen werden, und über den Kontakt mit Meerwasser möglich.

Die weitaus größere Rolle in diesem Zusammenhang spielen die alkalihaltigen Taumittel. Deshalb seien hier einige genannt:

- als wichtigster Vertreter das Natriumchlorid ( $\text{NaCl}$ )
- Mischsalze aus Natrium- und Calciumchlorid
- Kalium- und Natriumacetate bzw. -formiate („Clearway“ für Flugplätze)

Umfangreiche Untersuchungen von CHATTERJI [11] führen zu dem Ergebnis, dass Alkalisalze direkt an der AKR beteiligt sind und diese abhängig von der Salzart verstärken. Bestätigt wurde das auch durch Dehnungsmessungen von ÖTTL [52] an in 3%ige  $\text{NaCl}$  – Lösung getauchten Betonbalken, welche abhängig von der reaktiven Gesteinskörnung und dem ursprünglichen Alkaligehalt des Zementes eine verstärkte Reaktion zeigten. Schadensfördernden Einfluss haben die Alkalien nach [42], [43] aber nur dann, wenn sie als Hydroxid vorliegen. Ausführlich wird die Alkalizufuhr von außen in [66] beschrieben.

## Eigenschaften von Alkalisilikatgläsern und deren Lösungen

Die Herstellung von Alkalisilikat-Lösungen kann in drei Verfahren (Schmelz-, Sinter- und Hydrothermalverfahren) erfolgen. Bei den Schmelz- und Sinterverfahren werden Alkalikarbonate und Sande verarbeitet, beim Hydrothermalverfahren Alkalilaugen und Sande miteinander zur Reaktion gebracht. Lithiumsilikate sind über Schmelzverfahren zwar herzustellen, aber das Li-Silikat ist dann nicht wasserlöslich.

Der Modul von Alkalisilikat-Lösungen beschreibt den Quotient von  $\text{SiO}_2:\text{Me}_2\text{O}$ . Es werden Gewichts- oder Molarverhältnis unterschieden. Mit abnehmendem Modul steigt die Löslichkeit, der pH-Wert, die Dichte, die Wasserempfindlichkeit und die Klebe- und Bindefähigkeit. Mit zunehmenden Modul steigt die Viskosität, die Trocknungsgeschwindigkeit, die Härtungsgeschwindigkeit, die Kälteempfindlichkeit und chemische Beständigkeit. Die Lösung der Alkalisilikat-Gläser erfolgt in 2 Schritten [61]:

- im ersten Schritt findet ein Ionenaustausch zwischen den Alkalimetall-Ionen im Glas und den Wasserstoff-Ionen in der wässrigen Phase statt, dadurch wird die wässrige Phase alkalisch und es bildet sich eine schützende Schicht Silanolgruppen auf der Oberfläche des Stückglases
- die zweite Phase ist eine nucleophile Depolymerisation, unter diesen Bedingungen wird das Ausfallen oder eine Gelbildung durch Anheben der Temperatur unterbunden, bei Raumtemperatur geliert eine Lösung mit 2 - 3 % Kieselsäure mit 0,2 - 0,3 M Salzkonzentration (Alkalisalze)

Der Vorgang der Aggregation und der Gelbildung in Silikatsystemen ist einzigartig, weil im Gegensatz zu anderen Metalloxiden die Festsubstanz amorph und weitgehend wasserlöslich bleibt und in der Lösung im Gleichgewicht mit Monomeren ist. Die Aggregat- und Gelphasen sind in der Lösung nicht sichtbar, weil die Dichte und der Brechungsindex beider Phasen dieselben sind. Die Auflösungsgeschwindigkeit des Alkalisilikat-Glases ist abhängig von:

- der Leichtigkeit des Ionenaustauschprozesses
- der Stärke der Oberflächenschicht der Silanolgruppen
- der Diffusionsgeschwindigkeit der Alkalimetallionen durch die Oberflächenschicht

Diese drei Faktoren sind abhängig vom Alkalioxidgehalt des Alkalisilikat-Glases und damit vom Modul. Mit steigendem Modul nimmt die Löslichkeit ab. Kaliumsilikate sind hygroskopischer als entsprechende Natriumsilikate.

Folgende Strukturen fester Alkalisilikate sind bekannt [61]:

- Insel-, Gruppen-, Ring-, Ketten-, Band-, Schicht- und Gerüstsilikate
- Band- und Schichtsilikate (Amphibole und Phyllosilikate) kommen in der Natur sehr häufig vor, in handelsüblichen synthetischen Alkalisilikaten konnten sie jedoch bisher nicht nachgewiesen werden

Alkalisilikat-Lösungen sind je nach Konzentration und Modul unterschiedlich viskos. Dabei weist die unterschiedliche Viskosität auf den unterschiedlichen Polymerisationsgrad und auf

eine unterschiedliche Silikatstruktur hin. Die Verteilung der Silikatspezies in den Alkalisilikat-Lösungen ist von zwei unabhängigen Gleichgewichten beherrscht: vom Säure-Lauge-Gleichgewicht und vom Hydrolyse-Kondensationsgleichgewicht (Polymerisation-Depolymerisation). Gelöste Silikationen befinden sich in einem dynamischen temperatur-, konzentrations- und pH-abhängigen Hydrolyse- und Polymerisations-Gleichgewicht, wobei die Gleichgewichtseinstellungen sehr schnell erfolgen können. Strukturuntersuchungen an Natriumsilikat-Lösungen mit einem molaren Verhältnis Na : Si von 40 : 1 bis 0,5 : 1 zeigen bei abnehmenden Verhältnis eine Verschiebung von Monosilikat ( $Q^0$ ) zu polymeren Silikaten ( $Q^1$ ,  $Q^2$ ,  $Q^3$ ), d. h. mit abnehmendem Na : Si-Verhältnis findet ein kontinuierlicher Übergang von Monosilikat über cyclische und lineare Strukturen bis zu hochverzweigten und vernetzten Silikatstrukturen statt.

Der pH-Wert von Alkalisilikat-Lösungen zeigt folgendes Verhalten:

- mit steigender Temperatur nimmt die Hydrolyse und Alkalität stark zu
- mit zunehmender Verdünnung wird die Hydrolyse stärker, die Alkalität nimmt nicht im Maße der Verdünnung, sondern weitaus langsamer ab
- mit abnehmendem Molverhältnis  $SiO_2 : Me_2O$  wird mehr Alkali abgespalten, die Alkalität kieselsäurearmer Alkalisilikat-Lösungen ist daher größer
- bei einem molaren Modul von 1,0 haben Alkalisilikatlösungen einen pH-Wert von 13,5 und sie besitzen pH-Wert puffernde Wirkung
- Alkalisilikatlösungen sind weniger alkalisch als NaOH bei gleichem  $Na_2O$ -Gehalt

Einflussfaktoren auf die Viskosität von Alkalisilikat-Lösungen sind der Modul, die Konzentration der Lösung, die Temperatur und eventuelle Verunreinigungen. Für Natrium- und Kaliumsilikatlösungen gilt, je höher der Modul und auch je höher die Konzentration desto höher auch die Viskosität. Natriumsilikat-Lösungen mit hohem Modul verdicken sich beim Aufkonzentrieren oder Eintrocknen sehr schnell und erreichen plötzlich die Gelphase. Eine Temperaturerhöhung bewirkt ein Sinken der Viskosität. Kaliumsilikatlösungen zeigen bei gleichem Modul und gleicher Konzentration niedrigere Viskositäten als Natriumsilikatlösungen. Lithiumsilikatlösungen zeigen ein stark abweichendes Viskositätsverhalten, es steigt die Viskosität mit fallendem Modul im Gegensatz zu den Natrium- und Kaliumsilikatlösungen.

Folgende Reaktionen von Alkalisilikatlösungen mit Säuren, Basen, Salzen sind bekannt [61]:

- mit Säuren z. B. Schwefelsäure entstehen Kieselgele und gefällte Kieselsäuren
- mit Salzen z. B. Calciumsulfat entsteht Calciumsilikat und Alkalisulfat
- mit Aluminiumhydroxid entsteht ein Alkalialuminiumsilikat
- mit sauren Gasen entsteht ein fester Stoff, der in der Gießereiindustrie für den Formen- und Kernbau eingesetzt wird (Kohlensäure-Erstarrungs-Verfahren)



### 3.2 AKR-Prüfverfahren

In diesem Abschnitt sollen kurz wesentliche nationale und internationale Prüfverfahren beschrieben werden. Ausführliche Erläuterungen sind in [68] zu finden.

Es gibt bis zum jetzigen Zeitpunkt kein allgemein anwendbares Prüfverfahren, das für alle Gesteinskörnungen oder Betonrezepturen anwendbar ist. Somit konnte sich eine große Anzahl an Prüfverfahren entwickeln, wobei viele der Prüfungen an Laborbetonen oder unter Laborbedingungen hergestellten Mörteln durchgeführt werden. Teilweise sind diese Verfahren sehr zeitaufwendig, was für die praktische Anwendung im Bauwesen sehr hinderlich ist.

Für die Beurteilung der Alkaliempfindlichkeit von Gesteinskörnungen gibt es international eine Vielzahl unterschiedlichster Prüfverfahren. Hier werden neben direkten Prüfungen an den fraglichen Betonzuschlägen selbst oftmals auch langwierige indirekte Methoden an Probekörpern mit den Mischungsbestandteilen der vorgesehenen Betonrezepturen eingesetzt, wobei dann verschiedene Lagerungsarten in möglichst geringen Zeiträumen zu erwartende Umgebungsbedingungen simulieren sollen. So werden meist länderspezifisch in Abhängigkeit der klimatischen Verhältnisse, der Gesteinsvorkommen und der Betonanforderungen eigene Prüfvorschriften erlassen bzw. erfolgt eine Anpassung internationaler Verfahren an nationale Verhältnisse. Die Hauptkriterien, nach denen eine Einstufung der Gesteine bezüglich ihrer Alkaliempfindlichkeit erfolgt, sind meist das Erreichen bestimmter Dehnungswerte und Rissweiten von Betonprobekörpern, gelöste  $\text{SiO}_2$ -Mengen aus dem Gestein sowie röntgenografische und (elektronen-)mikroskopische Untersuchungsergebnisse, aber auch der RDM-Abfall, Ultraschalllaufzeit-Verlängerungen, bestimmte Eigenschaften der AK-Gele u.a.

Leider besteht prinzipiell das Grundproblem, dass es kein universelles Prüfverfahren gibt, was für sämtliche Gesteinskörnungen und/oder Betone mit ausreichender Genauigkeit und Reproduzierbarkeit eingesetzt werden kann.

Nachfolgend soll kurz auf die in der aktuell gültigen Fassung der DAfStb-Richtlinie „Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton“ (vom Feb. 2007) verankerten deutschen Prüfmethoden eingegangen werden und eine Auflistung weiterer bekannter Verfahren erfolgen. Genauere Informationen können den jeweils gültigen Normen aber beispielsweise auch der im Literaturverzeichnis dieser Arbeit angegebenen Literatur entnommen werden.

#### **Festlegungen der deutschen Alkali-Richtlinie (Stand Feb. 2007)**

Die aktuelle Fassung der Alkali-RiLi [14] besteht weiterhin aus drei Teilen. Im Teil 1 werden der Anwendungsbereich, die Gewinnungsgebiete, die vier Feuchtigkeitsklassen (neu hierbei die Feuchteklasse WS), die Anforderungen an die Betonausgangsstoffe und vorbeugende Maßnahmen beschrieben. In den Teilen 2 und 3 sind die Prüfvorschriften für einige der in Deutschland vorkommenden alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen enthalten. Der Teil 2 beschreibt Verfahren für Opalsandstein, Kieselkreide und Flint, welche unmittelbar am Korn durchgeführt werden, der Teil 3 relativ aufwendige Methoden an Laborbetonen mit präkambrischen Grauwacken bzw. anderen alkaliempfindlichen Gesteinen.

Die wichtigsten Änderungen im dritten Teil der Richtlinie gegenüber der Ausgabe von Mai 2001 sollen im Folgenden kurz beschrieben werden. Für die im Teil 3 erfassten Gesteins-

körnungen ist jetzt vor der bekannten Nebelkammerlagerung von Betonprüfkörpern ein Schnellprüfverfahren vorgeschrieben. Somit ergibt sich das in Abbildung 3.2.1 dargestellte Prüfschema.

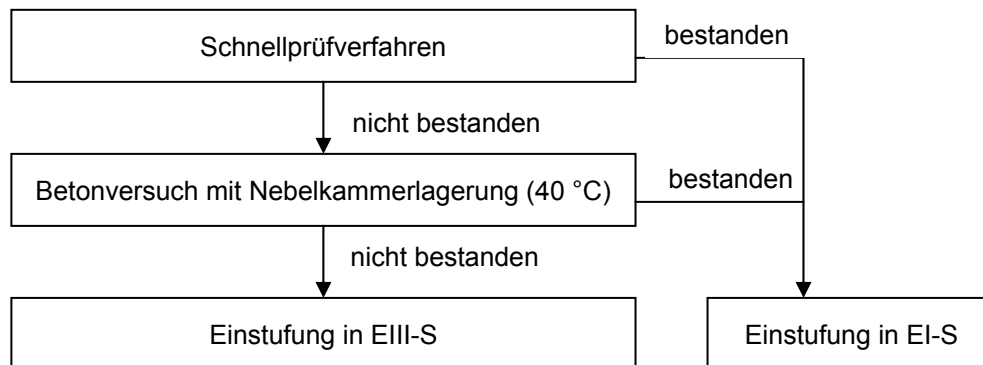


Abbildung 3.2.1 : Prüfschema für Gesteinskörnungen nach Teil 3 Alkali Rili

In der Richtlinie ist ein Referenzprüfverfahren mit einer Lagerung der hergestellten Mörtelprismen in 1 molarer Natronlauge beschrieben [14]. Als Alternativverfahren kann der hier kurz erläuterte Mörtelschnelltest (MST) angewandt werden. Dieser MST basiert auf dem anerkannten südafrikanischen NBRI-Test und wurde von Philipp u. a. an der LMPA Magdeburg entwickelt [53] und am FIB modifiziert. In Tabelle 3.2.1 sind die Kennwerte des Mörtelschnelltestes angegeben, Tabelle 3.2.2 zeigt die Bewertungskriterien des Tests.

Tabelle 3.2.1: Kenwerte des Mörtelschnelltests [64], [65]

Gesteinskörnung	aufbereitete Prüfkörnung ( $\frac{2}{3}$ ): <b>0,5/1 und 1/2 mm</b> alkaliumempfindlicher Quarzsand ( $\frac{1}{3}$ ): <b>0,1/0,5 mm</b>
Zement, w/z-Wert	CEM I 32,5 R ( $\text{Na}_2\text{O}$ -Äquiv. = $1,3 \pm 0,1 \text{ M.-%}$ ), w/z = 0,50
$\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalent	<b>2,5 M.-%</b> durch Zugabe von <b>NaOH</b> zum Anmachwasser
Prismen	4×4×16 cm <sup>3</sup> (Herstellung analog DIN EN 196-1)
Lagerung	<b>bei 70 °C über Wasser</b> bis zum 28. Tag
Messung	Dehnung und Masse <b>bei 20 °C</b> (Prismentemperatur)

Die Möglichkeit, eine Betonzusammensetzung hinsichtlich ihres Risikos einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion zu beurteilen bzw. zu prüfen, ist noch nicht in die Richtlinie aufgenommen. Am FIB ist ein Performance-Prüfverfahren entwickelt worden, mit dem eine solche Prüfung an einer einzusetzenden Rezeptur unter Nachbildung der realen Umweltbelastungen durchgeführt werden kann [64]. In Abbildung 3.2.2 ist der AKR-Klimawechselagerungszyklus für diese Performance-Prüfung dargestellt. Diese Lagerung stellt zeitraffend die wesentlichen Einflüsse aus den Umweltbedingungen (Befeuchtung, Austrocknung, Frost-Tauwechsel, Taumittleinwirkung) nach. Für diese Prüfung werden Betonbalken 10 cm x 10 cm x 40 cm aus der zu beurteilenden Betonrezeptur hergestellt und in eine Klimasimulationskammer eingelagert. Zwischen dem 6. und 8. Zyklus d. h. nach 133 bis 175 Tagen erfolgt die Beurteilung des Dehnungsverhaltens der Prüfkörper. Bei Taumittelbeaufschlagung liegt der Grenzwert bei 0,5 mm/m und ohne Taumittel bei 0,4 mm/m.

Tabelle 3.2.2: Bewertung der Dehnung im Mörtelschnelltest nach 28 Tagen Lagerung [64], [65]

Dehnung am 28. Tag nach Ende des Mörtelschnelltests	Bewertung der untersuchten Gesteinskörnung im Sinne des ARS 12/2006
$\epsilon \leq 1,5 \text{ mm/m}$	<b>Ausreichend alkaliunempfindlich.</b> Gesteinskörnung im Sinne des ARS 12/2006 <u>geeignet</u> .
$1,5 < \epsilon \leq 2,0 \text{ mm/m}$	<b>Potentiell alkalireaktiv.</b> Gesteinskörnung im Sinne des ARS 12/2006 <u>nicht geeignet</u> ohne Betonversuch (AKR-Performance-Prüfung des projektspezifischen Betons mit der Gesteinskörnung).
$\epsilon > 2,0 \text{ mm/m}$	<b>Alkalireaktiv.</b> Gesteinskörnung im Sinne des ARS 12/2006 <u>nicht geeignet</u> . Betonversuch (AKR-Performance-Prüfung des projektspezifischen Betons mit der Gesteinskörnung) möglich, aber mit steigendem Mörtelschnelltest- Dehnungswert sinkende Wahrscheinlichkeit eines positiven Eignungsnachweises.

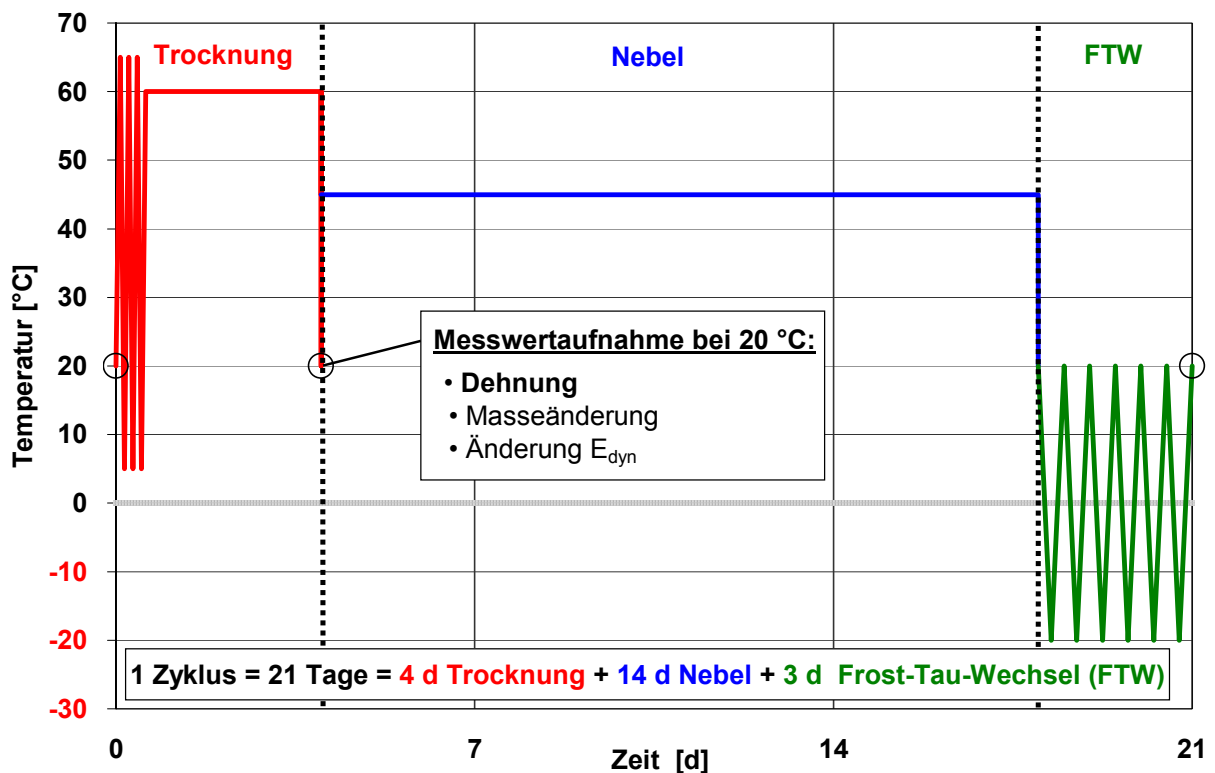


Abbildung 3.2.2: AKR-Klimawechsel-lagerungszyklus [64], [65]

## Zusammenstellung weiterer internationaler Prüfmethode

Tabelle 3.2.3 zeigt häufig genannte Testverfahren nach ihrer Prüfdauer geordnet. Zusätzlich zu den aufgeführten Verfahren wurden und werden infolge intensiver Forschungsarbeit auf nationaler Ebene weitere neue Prüfmethode mit dem Ziel entwickelt, genauere und vor allem schnellere Aussagen zur Alkaliempfindlichkeit treffen zu können. Auf diverse Messverfahren zur Bestimmung des Expansionsdruckes von Betonen und AK-Gelen soll auch im Hinblick auf die in dieser Arbeit entwickelte Versuchsapparatur in Abschnitt 3.3 noch einmal eingegangen werden.

Tabelle 3.2.3: Übersicht ausgewählter internationaler indirekter Testmethoden an Beton- bzw. Mörtelprismen

Norm/Prüfverfahren	Prüfdauer	Probekörper	Lagerungsbedingungen	Prüfkriterium
ASTM C 289	3-4 d	Gesteinskörnung 25g Korngruppe 0,15/0,3	1m NaOH, 80°C, 24h	gelöste Kieselsäure, Abnahme der Alkalität
ASTM C 227 ASTM C 441 (Wirksamkeit von Zusatzstoffen)	max. 12 Monate	Mörtel 2,5cmx2,5cmx28,5cm	über Wasser bei 38°C im verschlossenen Behälter	Dehnung
ASTM 1260	14 d	Mörtel 2,5cmx2,5cmx25cm	1m NaOH, 80°C	Dehnung
ASTM 1293	12 Monate	Beton 7,5cmx7,5cmx40cm	über Wasser bei 38°C im verschlossenen Behälter, Messung bei 23°C	Dehnung
NBRI-Test	10 d	Mörtel 2,5cmx2,5cmx25cm	1m NaOH, 80°C	Dehnung
RILEM-Test	14 d	Mörtel 4cmx4cmx16cm	1m NaOH, 80°C	Dehnung
Dänische Salz- Methode	3-6 Monate	Mörtel 4cmx4cmx16cm	gesättigte NaCl-Lösung, 50°C	Dehnung
Duncan-Methode	4 Monate	Mörtel 2,5cmx2,5cmx28,5cm	64°C, $\bar{N} \geq 0,9$	Dehnung
Japanische Schnelltests	2-4d	Mörtel 4cmx4cmx16cm	Autoklav, 110°C H <sub>2</sub> O, 2h 120°C H <sub>2</sub> O, 4-5h	Dehnung, Rissbildung, Ultraschall, dyn.E-Modul
Chinesischer Schnelltest	2d	Mörtel 1cmx1cmx4cm	Autoklav, 10%ige Kalilauge 150°C, 6h 100°C, 4h	Dehnung
chemical shrinkage method	20 h	25g Gesteinskörnung, Korngruppe 0,3/4,0	10m NaOH, 50°C	chemisches Schwinden
Gel Pat Test	max. 28 d	Gesteinskörner in Zement eingebettet	05,m NaOH und KOH, $\geq 20^\circ\text{C}$	qualitative Gelbildung
osmotic cell test	Max. 14 d	10g bis 20g Gesteinskörnung Korngruppe 0,15/0,3	1m NaOH	Flüssigkeits- verbrauch
UEA-Methode	1-2 d	Dünnschliff		Winkel der undulösen Auslöschung des Quarzes

### 3.3 Expansionsdrücke und Expansionsdruckmessungen

Während der erste Teil der Literaturrecherche wichtige, dem Verständnis dienende Grundlagen zum Schadensfall AKR im Beton enthielt, soll nachfolgend speziell der aktuelle Wissensstand zu Expansionsdrücken, welche für Dehnungen sowie Risse in Gestein und umgebender Mörtelmatrix verantwortlich sind, wiedergegeben werden. Hierfür ist es u. a. notwendig, wichtige Schadenstheorien genauer zu beleuchten, relevante Forschungsergebnisse zu den Besonderheiten der Gele aufzuzeigen und diverse bisherige Messmethoden zur Expansionsdruckbestimmung vorzustellen.

#### Theorien zur Schadensentstehung infolge einer AKR

Wie bereits bei der Darstellung der prinzipiell ablaufenden chemischen Reaktionen in Abschnitt 3.1 deutlich wurde, sind die Lösungsvorgänge des gittergestörten  $\text{SiO}_2$  im alkalischen Milieu nicht allein für die Betonschädigung bei einer AKR verantwortlich. Vielmehr spielen neben den Rissmechanismen der verschiedenen Gesteinskörnungen (siehe Abschn. 3.1) auch die Entstehungsbedingungen für AK-Gele und deren Möglichkeiten, Expansionsdrücke zu erzeugen, eine wichtige Rolle. Anhand einiger ausgewählter Schadensmodelle soll gezeigt werden, welche Vorgänge nach bisherigen Erkenntnissen und Vorstellungen im Bereich der reaktiven Gesteinskörnung ablaufen und damit zur Gefügerückbildung führen können.

##### *nach Sprung und Sylla (1998)*

Nach [63] findet im Anfangsstadium der AKR eine Reaktion zwischen der stark alkalihaltigen Porenlösung und der Oberfläche des reaktiven  $\text{SiO}_2$  – haltigen Gesteinskorns (bzw. bestimmter Zusatzstoffe) statt. Es bildet sich ein Reaktionssaum aus quellfähigem Alkalikiesel-Gel, was jedoch in Gegenwart von Calciumionen, die sich immer in der Porenlösung der angrenzenden Zementsteinmatrix befinden, instabil ist und zu einem nicht quellfähigen kristallinen Alkalicalciumsilikathydrat umgewandelt wird. Dieses besitzt die Eigenschaften einer semipermeablen Membran bzw. Schicht, welche bevorzugt Alkali-Ionen und Wasser in Richtung des Gesteinskorns durchlässt, für entstehende Reaktionsprodukte aber undurchlässig ist. Weist ein Zuschlagkorn im oberflächlichen Bereich kein reaktives  $\text{SiO}_2$  auf, kann sich keine derartige Membran ausbilden, aber durch das häufig anzutreffende dichte Gefüge ist ebenso die Diffusion der Alkalien und des Wassers in tiefer liegende Kornbereiche für die weitere Reaktion maßgebend.

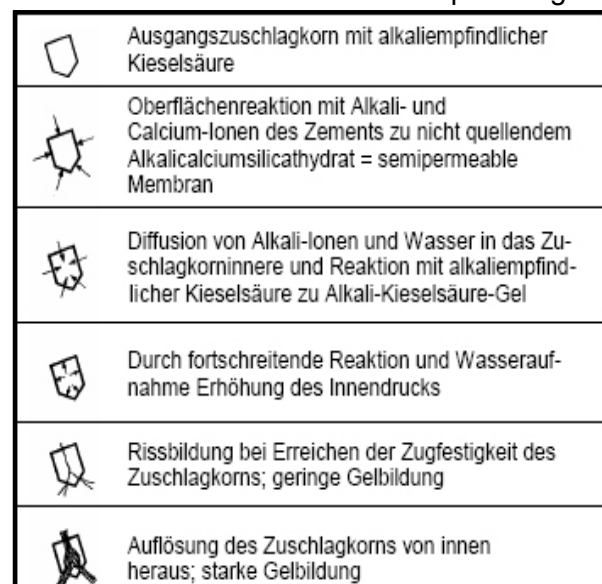


Abbildung 3.3.1: Schematische Darstellung der Schadensmechanismen bei einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion nach SPRUNG und SYLLA (Quelle: [63] S.342)

Befindet sich im Inneren des Zuschlages reaktive Kieselsäure, entsteht ebenfalls AK-Gel, wobei diesmal der direkte Kontakt zu Calciumionen stark eingeschränkt ist. Bei ausreichender Feuchtezufuhr quillt das Gel und ein Druck wird aufgebaut. Übersteigt dieser die Zugfestigkeit des Gesteins (bzw. auch des umgebenden Zementsteins) kommt es zum Riss, welcher sich bis in die Matrix fortsetzen kann, und damit zu einem Ausfließen des Gels.

Dieser Vorgang verläuft nach SPRUNG und SYLLA explosionsartig, da in Abhängigkeit von der Gesteinsfestigkeit beim Aufplatzen plötzlich eine Art Druckwelle entsteht, die das Gel herausschleudert und den Zementstein sowie nahe liegende Gesteinskörner regelrecht zertrümmert. Dieses explosionsartige Aufplatzen der Gesteinskörner ist allerdings eine bis zum heutigen Zeitpunkt nicht bewiesene Hypothese. Bei Dünnschliffuntersuchungen deutete eine Vielzahl von Rissen auf engstem Raum darauf hin. Wesentlichen Einfluss auf die Rissentstehung hat neben der Art und Menge der alkaliempfindlichen Bestandteile auch die Porosität einer Gesteinskörnung. So ist davon auszugehen, dass bei dichten und spröden reaktiven Zuschlägen (z. B. Grauwacken, Quarziten) bereits geringe Gelmengen für die Rissentstehung ausreichen, während bei porösen Gesteinskörnungen (z. B. Opalsandstein, poröser Flint) zunächst der Porenraum mit AK-Gel gefüllt wird und der Geldruck sehr viel später aufgebaut wird. Das Gesteinskorn an sich kann dann allerdings infolge der Auflösungserscheinungen schon erheblich geschädigt sein (siehe Abb. 3.3.2).



Abbildung 3.3.2: gequollenes Opalsandsteinkorn in einem Bohrkern nach Nebelkammerlagerung (Quelle: [27] S. 16)

#### **nach Chatterji et. al.(1986/87)**

Das Schadensmodell von CHATTERJI entspricht im Wesentlichen auch denen im ersten Schadensmodell genannten Vorgängen, wobei aber insbesondere auf den Einfluss des  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  – Gehaltes und der Alkali- bzw. Alkalisalzkonzentration in der Porenlösung hingewiesen wird [11], [12]. So geht man hier davon aus, dass bei Anwesenheit von Calciumhydroxid anfänglich Wassermoleküle, Alkali-Ionen und Hydroxidionen in das reaktive Gesteinskorn eindringen und Calciumionen sowie die Anionen aus vorhandenen Alkalisalzen (z. B.  $\text{NaCl}$ ) in der Porenlösung verbleiben (Abb. 3.3.3). Es kommt zu Lösevorgängen im Gestein, da durch die Hydroxidionen  $\text{Si-O-Si}$  – Bindungen aufgebrochen werden. Dies führt nun dazu, dass eine weitere Penetration von Ionen (jetzt auch von  $\text{Ca}^{2+}$ ) ermöglicht wird und gelöstes  $\text{Si}^{4+}$  aus dem Gesteinskorn herausdiffundiert und mit den Alkalien ein quellfähiges Kieselsäure-Gel bzw. bei ausreichend vorhandenem  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  nicht quellfähige Calciumsilikathydrate (C-S-H) bilden kann. Ob es zu einer schädigenden Dehnung im Beton kommt, hängt nach CHATTERJI vom Verhältnis der eindringenden zu den herausdiffundierenden Ionen ab. Bei einem geringen Alkaligehalt der Porenlösung dringt nur eine begrenzte Menge an  $\text{OH}^-$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  und  $\text{Ca}^{2+}$  in das Zuschlagkorn ein. Gründe dafür sind die verhältnismäßig großen Durchmesser der  $\text{Ca}^{2+}$  – Ionen und die Ausbildung einer Art Hülle aus



C-S-H – Phasen, welche Diffusionsvorgänge in das Korn stark behindert. Ist der Alkaligehalt sehr hoch, können viele kleinere Alkali-Ionen zusammen mit dem  $\text{OH}^-$  und  $\text{H}_2\text{O}$  relativ ungehindert in das Gestein gelangen. Liegt dabei ausreichend  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  bzw. eine hohe Alkalisalz-Konzentration in der Porenlösung vor, wird der Materialstrom ins Korninnere noch gefördert. Gleichzeitig kann dann nur eine geringe Menge an  $\text{Si}^{4+}$  bzw. gebildetem AK-Gel aus dem Gestein herausdiffundieren, da die Calciumsilikathydrat-Hülle sehr schnell und unmittelbar um das Gesteinskorn entsteht. Es baut sich abhängig von der vorhandenen Feuchte ein Quelldruck auf, der bei Erreichen der Zugfestigkeit zum Aufreißen des Korns und des Zementsteines führen kann.

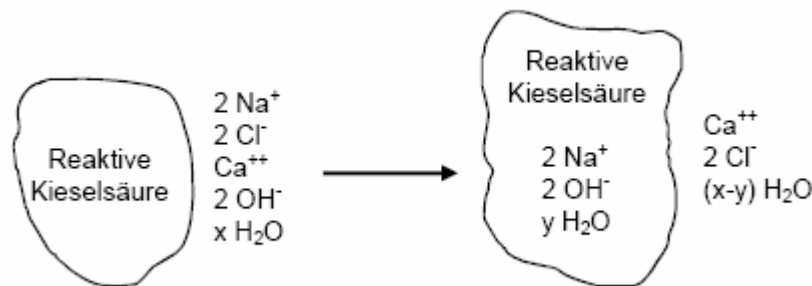


Abbildung 3.3.3: mögliche ablaufende Reaktionsvorgänge beim Schadensmodell nach CHATTERJI (Quelle: [11] S.253)

Sollte die Menge an  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  in der Porenlösung bzw. die Alkalisalz-Konzentration sehr gering sein (z. B. infolge einer Reaktion mit Betonzusatzstoffen), reduziert sich auch die Anzahl des eindringenden  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{OH}^-$  und  $\text{H}_2\text{O}$ , wobei gleichzeitig eine große Menge an  $\text{Si}^{4+}$  aus dem Korn herausdiffundieren kann ohne die sofortige Bildung einer Hülle aus C-S-H – Phasen um das Gestein. Der Aufbau eines Quelldruckes ist nicht möglich.

#### **nach Powers und Steinour (1955)**

Im Gegensatz zum Schadensmodell von CHATTERJI, bei dem das  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  eine beschleunigende Wirkung auf den Ablauf der AKR hat, gehen POWERS und STEINOUR von einem reaktionshemmenden Einfluss aus [54].

In ihrer Modellvorstellung (siehe Abb. 3.3.4) treffen in einer ersten Reaktionsphase Alkalien, Hydroxidionen und Wasser auf die Oberfläche des reaktiven Gesteinskorns (Untersuchungen erfolgten an Opal). Das  $\text{OH}^-$  greift Siloxanbrücken an, so dass  $\text{O}^-$  – Enden entstehen, welche dann wasseranziehende Alkali-Ionen ( $\text{Na}^+$ ) binden können. Das heißt, quellfähige Alkali-Silica-Komplexe werden gebildet.

Im weiteren Verlauf kommt es zum Einbau von Calcium-Ionen in dieses AK-Gel, so dass dessen Quellfähigkeit reduziert und ein Teil der Alkalien wieder freigesetzt werden kann (Es stehen dann erneut Alkalien für eine fortschreitende AKR und Gelbildung zur Verfügung.).

Ob es zu einer „betonschädlichen“ oder „betonunschädlichen“ Reaktion kommt, hängt im Wesentlichen von der Alkalienkonzentration der Betonporenlösung ab. Bei einer bereits ursprünglich geringen Alkalimenge (gegeben bei Zementen mit  $\bar{N} \leq 0,6 \%$ ) bzw. hohen Gehalten und/oder großen Feinheiten der reaktiven Kieselsäure und dem damit verbundenen großen Alkalienverbrauch in der ersten Reaktionsphase, steigt die Calcium-Konzentration an. Das fördert die Entstehung nicht quellfähiger und damit unschädlicher Reaktionsprodukte. Ist der Alkaligehalt sehr hoch, wird in Abhängigkeit der reaktiven Gesteinsoberfläche nur ein

geringer Anteil der Alkalien gebunden. Die Calcium-Konzentration in der Porenlösung bleibt gering (Portlandit geht nicht in Lösung), so dass die gebildeten Alkali-Silica-Komplexe gar nicht bzw. nur teilweise in den ganz außen liegenden Bereichen in nicht quellfähig Gele umgewandelt werden können. Bei ausreichend vorhandener Feuchte sind demnach die weiter innen liegenden calciumarmen AK-Gele in der Lage einen Quelldruck aufzubauen, was Betondehnungen und die Entstehung von Rissen zur Folge haben kann.

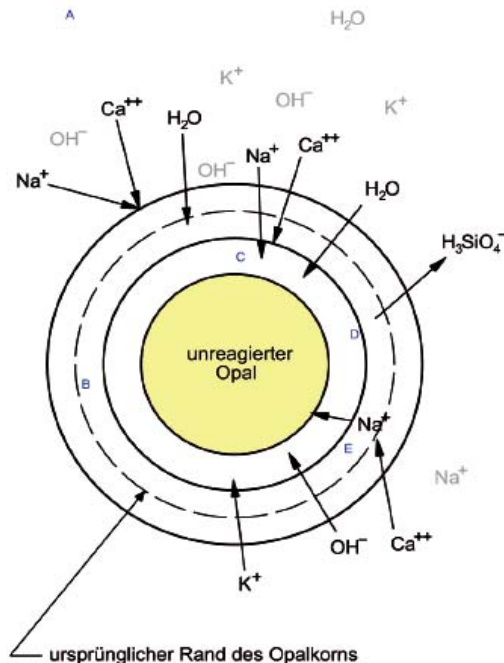


Abbildung 3.3.4: die Reaktion eines Opalkorns nach dem Modell von POWERS und STEINOUR (Quelle: [26] S. 36)

**A:** Porenlösung mit  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{OH}^-$  und  $\text{H}_3\text{SiO}_4^-$

**B:** ursprünglich quellfähiges AK-Gel, was durch den Einbau von  $\text{Ca}^{2+}$  in nicht quellfähiges Gel (C-N-S-H) umgewandelt wird; der Calcium-Gehalt in der Porenlösung ist von der Alkalien-Konzentration abhängig

**C:** weitere Gelentstehung nach einem diffusionsgesteuerten Eindringen von Ionen durch die C-N-S-H-Schicht;

geringe  $\text{Ca}^{2+}$  - Gehalte  $\rightarrow$  quellendes N-S-H - Gel,  
hohe  $\text{Ca}^{2+}$  - Gehalte  $\rightarrow$  nicht quellendes C-N-S-H - Gel

**D:** für eine betonunschädliche Reaktion muss mehr  $\text{H}_3\text{SiO}_4^-$  herausdiffundieren als  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  und  $\text{OH}^-$  eindringen können

**E:** Alkalien werden teilweise wieder freigesetzt, wenn das  $\text{Ca}^{2+}$  mit dem N-S-H - Gel reagiert

### nach Dent Glasser (1979)

DENT GLASSER geht in seinem Modell davon aus, dass das gebildete Gel die Konzentrationstrennung zwischen den äußeren und inneren Lösungen darstellt [13]. Silikagele können eine bestimmte Menge Wasser aufnehmen ohne zu quellen, da ihr Gefügebau, d. h. die inneren Bindungskräfte, die Grenze der Wasseraufnahme setzt. Werden diese Gele einem alkalischen Milieu ausgesetzt, werden die Si-O-Si-Bindungen aufgebrochen und die Bindungskräfte stark gesenkt. Zur selben Zeit dringen Natrium- und Kaliumionen in das Gel ein und bilden ein elektrisches Potenzial. Ihre Anwesenheit steuert die Wasseraufnahme des Gels. Das Silikagel wird zu einem gelartigen Polyelektrolyt, welches nur noch geringe innere Bindungskräfte besitzt und so bei Wasseraufnahme quellen kann. Immer mehr Hydroxidionen dringen in die Silikatstruktur ein und der Prozess beschleunigt sich dadurch. Wenn dieser Vorgang in einem wechselnd durchfeuchtetem Beton stattfindet, schaukelt sich dieser durch Trocknung und Widerbefeuchtung auf. So können im Betongefüge Quelldrücke erreicht werden, die möglicherweise den Beton zerstören können. Es werden folgende Theorien für den Vorgang der Reaktion genannt:



1. Silika wird in einer alkalischen Lösung hochpolymerisiert und bildet ein Gel. In diesem Gel wird eine Membran gebildet bzw. das Gel ist die Membran,
2. Es gibt zwei Möglichkeiten für die Calciumverteilung.

Wenn die  $\text{Ca}^{2+}$  Aktivität in der äußeren Lösung höher als in der inneren ist, ist es nicht zu erklären warum Wasser in die innere Lösung diffundieren sollte. Es sei denn, die osmotische Aktivität der Silikatverbindung in der Membran ist höher als die der Hydroxidionen außerhalb der Membran.

Ist die  $\text{Ca}^{2+}$  Aktivität der inneren Lösung höher als die der äußeren, ist es nicht zu erklären warum die C-S-H-Verbindungen nach der Membran zerstört werden sollen aber nicht davor.

### weitere Schadenstheorien

Neben den o. g. Schadensmodellen gibt es eine Vielzahl weiterer mehr oder weniger umfangreicher Erklärungsversuche für die genauen Schädigungsmechanismen bei einer AKR. Beispielsweise geht HOBBS nach Untersuchungen mit Opal davon aus, dass lediglich die Menge des gebildeten AK-Gels (abhängig vom Verhältnis  $\text{SiO}_{2(\text{reaktiv})}/\text{Alkalien}$ ) für eine betonschädliche Dehnung verantwortlich ist. Als untere Grenze gibt er einen Anteil von 0,004 bezogen auf den Mörtelgehalt an [26]. URHAN stellte die Hypothese auf, dass eine AKR von vielen Kriterien abhängt, aber grundsätzlich nur dann stattfindet, wenn die Kristallisationsgeschwindigkeit der C-S-H – Phasen höher ist als die Lösungsgeschwindigkeit des  $\text{SiO}_2$  und sich deshalb eine Kruste auf dem  $\text{SiO}_2$  – Korn bildet [75]. Des Weiteren werden häufig bestehende Schadenstheorien überarbeitet und Anpassungen infolge neuerer Untersuchungsergebnisse vorgenommen. So versuchten WANG und GILLOTT die Modelle von CHATTERJI und POWERS/STEINOUR in Einklang zu bringen, indem auch sie von einer Reaktionsbeschleunigung bei hohen  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  – Gehalten ausgingen, aber dafür nicht das Calcium sondern das gesteigerte Angebot an  $\text{OH}^-$  verantwortlich machten. Weiterhin

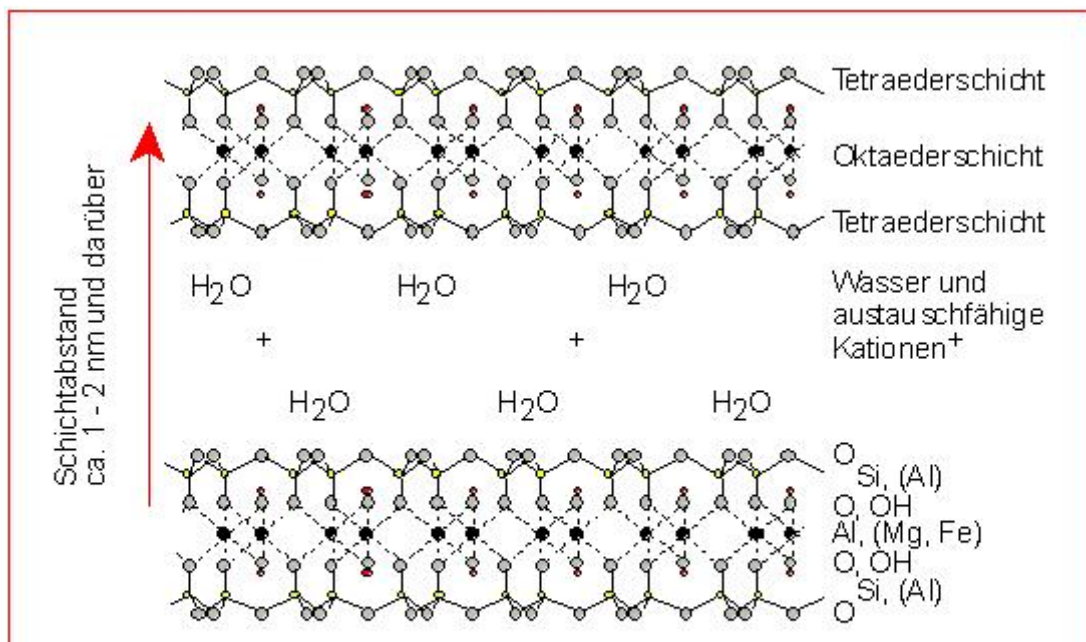


Abb. 3.3.5: Quellvermögen des Tonminerals Montmorillonit in idealisierter Darstellung nach Hofmann, Angew. Chemie 80, S. 736 - 747 (1968)

bestätigen sie, dass beim Einbau von Calcium in AK-Gele erneut Alkalien freigesetzt werden, welche dann für eine weitere Reaktion zur Verfügung stehen [26]. Obwohl bei den meisten Schadensmodellen von einer Zerstörung des Gesteins und der umgebenden Mörtelmatrix infolge festigkeitsüberschreitender Quelldrücke durch Wasseraufnahme des AK-Gels, ähnlich der eines Tonminerals, ausgegangen wird (siehe Abb. 3.3.5), spielen nach der Auffassung einiger Forscher auch die osmotischen Drücke im Bereich des Zuschlagkorns eine bzw. die entscheidende Rolle. Dass hierin durchaus eine Ursache für die Schadensentstehung gesehen werden kann und deshalb weiterer Forschungsbedarf auf diesem Gebiet besteht, zeigen die bisher veröffentlichten Ergebnisse von Untersuchungen zum Quelldruck synthetisch hergestellter AK-Gele, wo bisher bis auf wenige Ausnahmen Werte in einer Größenordnung von rd.  $1 \text{ N/mm}^2$  ermittelt wurden [36], [37], [60], [77] und [80]. Mit dem bisherigen Wissensstand ist es also nicht auszuschließen, dass die Grenzbereiche der Zugfestigkeiten von Gestein und Mörtelmatrix nicht nur durch das Quellen eines Gels erreicht werden.

Auch theoretische Überlegungen von SIDERIS führten zu dem Ergebnis, dass im reagierenden Gesteinskorn osmotische Drücke bis zu  $18 \text{ N/mm}^2$  entstehen können [62]. Nach [26] sind bei hoch konzentrierten NaOH – Lösungen und abnehmenden Luftfeuchten sogar noch weitaus höhere Werte möglich.

### **osmotischer Druck**

Wie aus zahlreichen Stoffwechselvorgängen in der Natur bekannt ist, stellt die Osmose eine spezielle Art der Diffusion durch eine semipermeable Trennwand/Membran („*Diaphragma*“) dar. D. h. werden zwei Flüssigkeiten bzw. Lösungen unterschiedlicher Konzentrationen durch eine derartige Membran getrennt (Abb. 3.3.6), ist nur eine Flüssigkeit bzw. nur das Lösemittel und nicht der gelöste Feststoff in der Lage, diese in Richtung der höheren Konzentration zu durchwandern. Infolgedessen nimmt in diesem Bereich die Flüssigkeitsmenge solange zu, bis der osmotische Druck dem hydrostatischen Druck das Gleichgewicht hält (Abb. 3.3.7). Auf die semipermeable Schicht wirken dabei Kräfte, die ohne weiteres deren Festigkeit überschreiten können. Übertragen auf das reagierende Gesteinskorn im Zementstein bedeutet dies, dass eine Schädigung infolge osmotischer Drücke genau dann eintritt, wenn im äußeren Randbereich des Zuschlages eine teildurchlässige Schicht existiert und innerhalb bzw. außerhalb dieser geschlossenen „Hülle“ Flüssigkeiten mit unterschiedlichen chemischen Potentialen vorhanden sind (z. B. innerhalb: Alkali-Silikat-Gel / -Lösung, außerhalb:  $\text{Ca(OH)}_2$  –

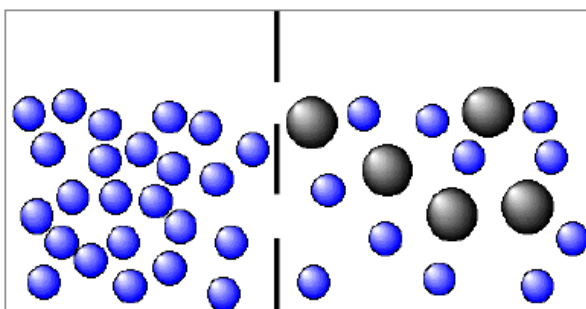


Abbildung 3.3.6: Flüssigkeiten unterschiedlicher Konzentrationen (z.B. links: Lösemittel / rechts: Lösemittel + Feststoff)

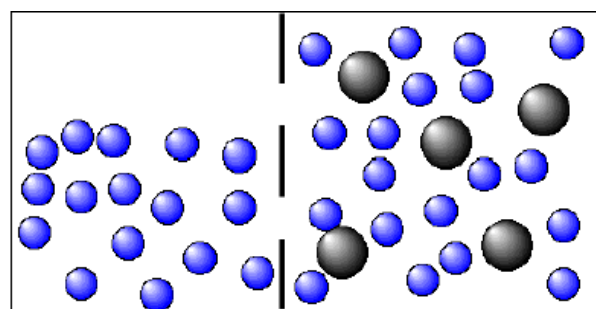


Abbildung 3.3.7: Diffusion durch eine semipermeable Membran zur höher konzentrierten Lösung, Ausbildung eines Gleichgewichtes zwischen osmotischem u. hydrostatischem Druck

haltige Porenlösung). Nachdem man bereits zu Beginn der AKR-Forschung Untersuchungen mit Hilfe osmotischer Zellen [26], [62] durchführte, deren Ergebnisse aber schlecht reproduzierbar waren und teilweise fehlgedeutet wurden, beschäftigen sich seit einigen Jahren insbesondere YIN und WEN [77], [80] mit der Entstehung osmotischer Drücke bei einer AKR. So geht man in [77] davon aus, dass die erforderliche semipermeable Membran in erster Linie durch die Bildung von dichten und damit ausreichend starken C-N-S-H – Phasen entsteht, aber auch der Zementstein in der unmittelbaren Umgebung des Gesteinskorns aufgrund seines hohen Porenanteils unter 400 nm wie ein molekulares Sieb wirken kann. Weiterhin könnten zumindest temporär AK-Gele mit einem hohen Polymerisationsgrad des  $\text{SiO}_2$  in Bereichen mit geringerem Wasser- und Alkalienangebot die Funktion einer teildurchlässigen Schicht übernehmen. Die Entstehungsbedingungen für eine Vielzahl osmotischer Zellen im Beton sind demnach gegeben und die unterschiedlichen flüssigen Reaktionsprodukte können nach YIN und WEN als „Hauptverursacher“ von Betonschäden bei einer AKR betrachtet werden. Zur Unterstützung dieser Hypothese werden u. a. folgende Punkte aufgeführt:

- Im Gegensatz zur Quelldrucktheorie, wo das gebildete quellfähige Material zwar Feuchte aufnimmt (= Druckentstehung), es dabei aber seine Grundstruktur behält, d. h. keine Lösung oder Diffusion der festen Bestandteile stattfindet, ist bei der osmotischen Theorie aufgrund der o. g. Membranausbildung ein Aufbau von Drücken auch nach einem Inlösungsgehen von festen Bestandteilen möglich. Dies scheint sehr realitätsnah, da das System  $\text{Na}_2\text{O-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$  relativ instabil ist. Sein stark hygroskopisches Verhalten kann zu sehr geringen Viskositäten bis hin zu Auflösungserscheinungen ähnlich den kolloiden Teilchen in einer Dispersion führen, wobei das Wasser hier als eine Art Dispergiermittel fungieren könnte.
- Die bei Quelldruckuntersuchungen von STRUBLE teilweise festgestellten Dehnungsverläufe künstlicher Gele, bei denen sich latente und sprunghaft ansteigende Perioden abwechselten bzw. eine konstante Dehnungszunahme stattfand, immer gefolgt von einem plötzlichen Abfall der Dehnungen, könnte mit der osmotischen Theorie ebenso erklärt werden, wie die Entstehung eines Pessimums für die AKR [77].

Zusammenfassend zu den Schadenstheorien kann festgestellt werden, dass einige Autoren die Bildung einer semipermeablen Membran (Schicht) um das Gesteinskorn als Voraussetzung für das Ablaufen einer AKR ansehen, andere Modelle jedoch diese Membranbildung nicht beschreiben. Wie der Druck, der zur Aufspaltung des Korns und dann zur Schädigung des Betons führt, entsteht, ist weitgehend unklar.

## Messverfahren zur Expansionsdruckbestimmung von AK-Gelen

Wie in Abschnitt 3.2 gezeigt, dienen als Prüfmethode für die Einstufung der Alkaliempfindlichkeit von Gesteinskörnungen und Betonen hauptsächlich Dehnungsmessungen, Rissuntersuchungen, mikroskopischen Betrachtungen usw.

Nachfolgend sollen ausgewählte Messverfahren vorgestellt werden, welche sich intensiver mit den entstehenden Expansionsdrücken infolge einer AKR beschäftigen. Dabei wird zwischen Untersuchungen an Beton- bzw. Mörtelprobekörpern und an den reinen, synthetisch hergestellten AK-Gelen bzw. Alkali-Silikat-Lösungen unterschieden. Relevante bei den jeweiligen Verfahren erhaltene Messergebnisse sowie Rückschlüsse bezüglich der o. g. Geleigenschaften und Schadenstheorien werden zusammenfassend dargestellt.

### ***Spanndrahtmethode nach KUHLMANN et. al.***

Eine relativ simple Methode zur Messung der Expansionsdrücke von Mörtel- oder Betonprismen stellt die Spanndrahtmethode von KUHLMANN et. al. dar [38]. Sie beruht auf der elastischen Verformung von Stählen mit einer hohen Elastizitätsgrenze. Hierzu werden im Bereich der späteren Probekörper-Längsachse rostfreie Gewindestangen angeordnet und exakt senkrecht in Ankerplatten geschraubt (dünne Drähte würden den Eichaufwand vermindern aber die Konstruktion der Messelemente erschweren). Um eine möglichst starre Verbindung ohne Spiel zu erreichen, erfolgt eine zusätzliche Befestigung mit Kontermuttern (siehe Abb. 3.3.8).

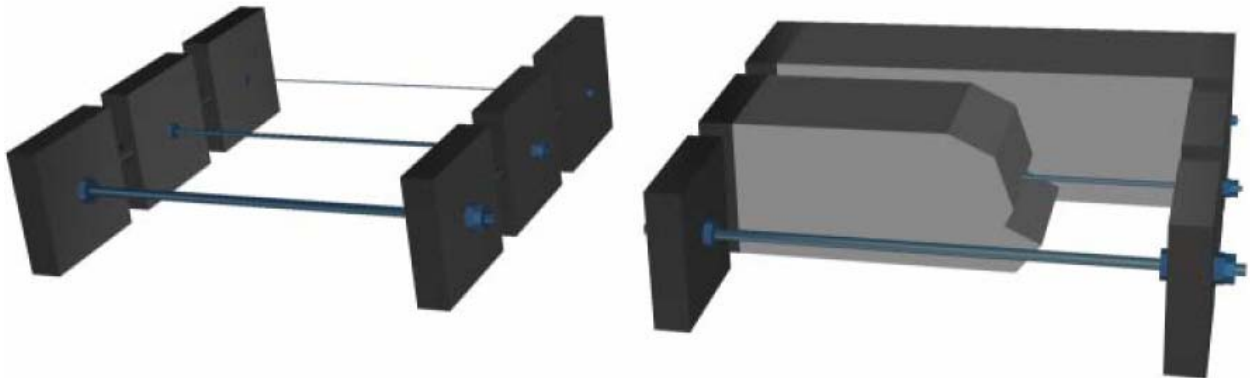


Abbildung 3.3.8: "Spanndrahtmethode" nach KUHLMANN et. al.: Gewindestangen unterschiedlichen Durchmessers zur Spannungsaufnahme, Ankerplatten an den Stirnseiten von Mörtel- bzw. Betonprismen (4 x 4 x 14cm)

Die Stange nimmt die in Längsrichtung wirksam werdenden Kräfte des expandierenden Probekörpers auf und dehnt sich. Ist ihr Querschnitt dabei so bemessen, dass die Behinderung stark ist bzw. nur sehr geringe Längenänderungen möglich sind, kann diese Verformung als elastisch angesehen und bei bekanntem E-Modul des Spanndrahtes über Spannungs-Dehnungs-Beziehungen (HOOKEsches Gesetz) auf die jeweiligen Expansionskräfte der Probe geschlossen werden. Da es bei der Dehnung der Gewindestangen bzw. Drähte jedoch zwangsweise zu Volumenveränderungen im System kommt, muss die Maximalkraft durch eine Extrapolation von mit verschiedenen starken Bewehrungen ermittelten

Kräften bestimmt werden. Hierzu werden Stähle mit unterschiedlichen Durchmessern verwendet.

Die Spanndrahtmethode stellt insgesamt eine gute Möglichkeit zur Expansionsdruckbestimmung verschiedenster bindemittelhaltiger Baustoffe dar, jedoch kann die Überlagerung von Temperaturdehnungen, Schwind- und Quellprozessen sowie Treiberscheinungen infolge einer AKR wie auch bei anderen derartigen Untersuchungen an Beton- bzw. Mörtelproben zu erheblichen Schwierigkeiten bei der Auswertung der Messergebnisse führen. Insbesondere die Einflüsse aus einem Temperaturanstieg infolge der Zementhydratation und dem Verbund Gewindestab/Beton erhöhen bei diesem Verfahren die Messungenauigkeiten.

### **ASGPM – Test nach BINAL**

Der ASGPM-Test (Alkali Silica Gel Pressure Measuring) ist eine von BINAL entwickelte neue Prüfmethode für Expansionsdruck-Untersuchungen an Beton- bzw. Mörtelprobekörpern [5]. Es können die in Längsrichtung infolge einer Ausdehnungsbehinderung erzeugten Drücke unter reaktionsfördernden Bedingungen (erhöhte Temperatur / Feuchte / Alkalienzufuhr) gemessen werden. Die Apparatur (Abb. 3.3.9) setzt sich dabei aus drei wesentlichen Bestandteilen zusammen:

#### *1) dem Hauptrahmen*

Auf einer gleichzeitig als Sockel dienenden mechanischen Spannvorrichtung (für das Aufbringen einer Vorspannung) sind zwei abgeschrägte Stahlstäbe zur Höhenverstellung bei unterschiedlichen Prüfkörperlängen befestigt.

#### *2) einer Wärme-Prüfkammer*

Sie besteht aus einem inneren und einem äußeren zylinderförmigen rostfreien Stahlbehälter, wobei sich im Zwischenraum Glasfasern als Wärmedämmmaterial befinden. Ein Thermostat regelt über auswechselbare Heizelemente automatisch die Temperaturen im Bereich von 30°C bis 100°C im Inneren des Behälters.

#### *3) der Messeinheit*

Die Lastzelle ( $\leq 20$  kN) ist mit einer digitalen Messeinheit verbunden, welche die ermittelten Werte zur Weiterverarbeitung sofort über eine serielle Schnittstelle an einen Computer leitet. Für die Ermittlung günstiger Probekörperabmessungen wurden neben dem Expansionsdruck in Längsrichtung auch die Ausdehnungen und Drücke in Querrichtung sowie die Verkrümmung von prismatischen und zylindrischen Prüfkörpern mit Opal (reaktiv) bzw. Kalkstein (nicht reaktiv) untersucht [5].



Zylinder mit einem Durchmesser von 35mm und 250mm Höhe stellten sich dabei als die für dieses Verfahren am besten geeigneten dar.

Vor Beginn einer Expansionsdruck-Prüfung werden die Prüfzylinder – jeweils einen reaktiven Zuschlag enthaltend – vorerst mit einer Höhe von 300mm hergestellt, nach  $24 \pm 2$  h ausgeschalt, für weitere 6 Tage bei  $23^\circ\text{C}$  und 95 % r. F. gelagert und anschließend auf 250 mm gesägt. So können Unstetigkeiten aus einer eventuellen Sedimentierung ausgeschlossen werden. Die Prüfung an sich erfolgt nach folgendem Ablaufschema:

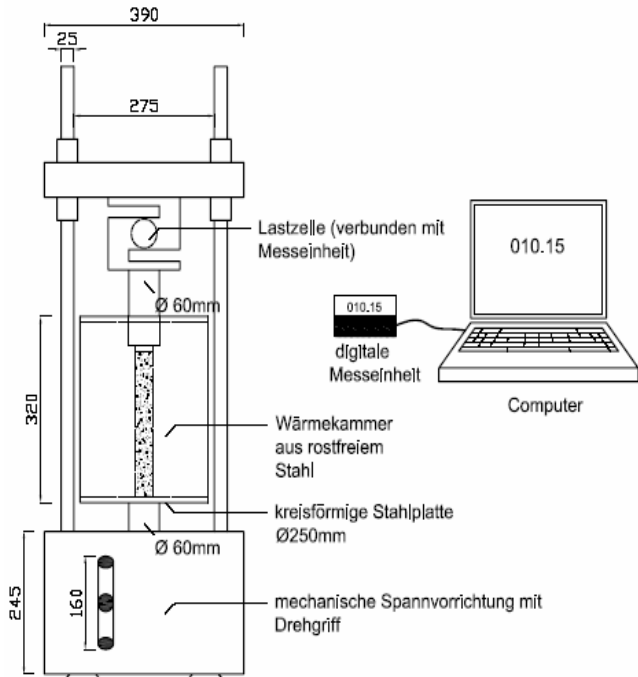


Abbildung 3.3.9: Prüfeinrichtung zur einaxialen Messung von Expansionsdrücken infolge einer AKR (Quelle: [5] S. 267)

- Einlagerung der Prüfzylinder in die Stahlbehälter, welche mit destilliertem Wasser befüllt werden, für 24 Stunden bei  $80^\circ\text{C}$
- Messung des Ausgangsdruckes
- Austausch des Wassers durch eine 1M NaOH – Lösung
- stündliche Geldruck-Messung, bis sich die Werte nicht mehr verändern
- Subtraktion des Ursprungswertes vom erhaltenen maximalen Endwert

Die so durchgeführten ASGPM – Tests zeigten, dass die Expansionsdruck-Entwicklung analog zu der von OBERHOLSTER und DAVIS [51] festgestellten Dehnungsentwicklung in drei Phasen einteilbar ist – eine Induktionsphase, eine Hauptdruckentwicklungs-Phase und eine späte Druckentwicklungs-Phase. Weiterhin konnte neben einem stark variierenden Anstieg der Expansionsdrücke bei verschiedenen Gesteinsarten für unterschiedliche w/z – Werte eine Art Pessimumverhalten bezüglich des maximalen Expansionsdruckes festgestellt werden (siehe Abb. 3.3.10).

Anhand von Trendberechnungen wurde außerdem gezeigt, dass man mit diesem Messverfahren aufgrund der spezifischen Expansionsdruckentwicklung in der Lage ist, bereits nach 30 Tagen eine Aussage zum Schädigungspotential verschiedener reaktiver Gesteinskörnungen zu treffen.

In neuesten Messungen wurden mit dieser Methode Opal, Flint, Chalcedon, Andesit,

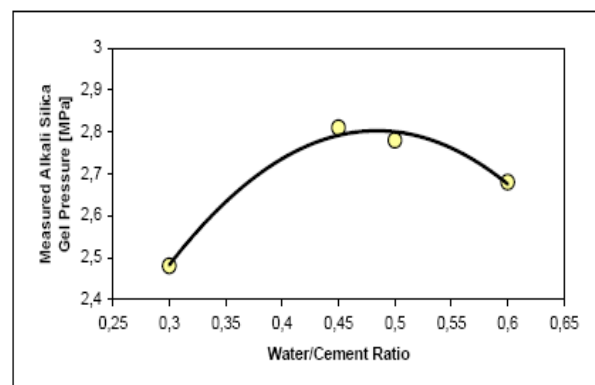


Abbildung 3.3.10: Veränderung des Geldruckes bei unterschiedlichen w/z - Werten (Quelle: [5] S. 269)

Grauwacke, Basalt, Granodiorit, Quarzit und Ignimbrit Gesteinskörnungen überprüft [6]. Dabei konnten Quelldrücke von  $0,19 \text{ N/mm}^2$  bis  $2,81 \text{ N/mm}^2$  je nach eingesetzter Gesteinskörnung ermittelt werden. Die Messdauer beträgt bei diesen Untersuchungen zwischen 40 bis 80 Tagen. Basierend auf dieser Messmethode wird ein neuer Ansatz zur Einschätzung der AK-Reaktivität von Gesteinskörnungen vorgestellt.

### **Expansionsdruckmessung nach KAWAMURA**

Ausführliche Untersuchungen zur Zusammensetzung und dem Expansionsdruck von AK-Gelen wurden in den letzten Jahren von KAWAMURA und IWAHORI durchgeführt [33], [34]. Als Messapparatur für die Geldruckbestimmung diente dabei ein verstellbarer Stahlrahmen mit Lastzelle (siehe Abb. 3.3.11), welcher auch die Vorlage für den im ASGPM – Test nach BINAL beschriebenen Versuchsaufbau darstellte. Reaktive Gesteinskörnung enthaltende Mörtelprismen ( $4 \text{ cm} \times 4 \text{ cm} \times 16 \text{ cm}$ ) werden hier 24 Stunden nach ihrer Herstellung in das Prüfgerät eingesetzt, worauf dann über einen Zeitraum von mehreren Wochen AKR-induzierte Längsdehnungen durch die Verschiebungsbehinderung in Form von Expansionsdrücken gemessen werden. Die Daten werden direkt an einen Computer geleitet und dienen dort der Weiterverarbeitung. Um die Reaktionsbedingungen zu fördern, wird die gesamte Apparatur in einem Klimaraum bei  $38^\circ\text{C}$  und 95 % relativer Feuchte eingelagert.

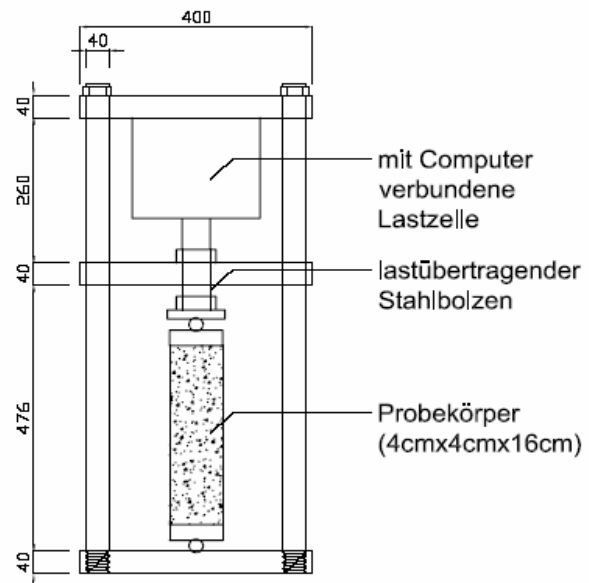


Abbildung 3.3.11: Darstellung des Stahlrahmens zur Expansionsdruckbestimmung nach KAWAMURA (Quelle: [33] S. 49)

Die Expansionsdruckbestimmungen sowie begleitende Messungen der freien Dehnungen, Analysen der Porenlösungen und elektronenmikroskopische Untersuchungen von Mörteln mit Flint, Kieselschiefer und Pyrex-Glas als alkaliempfindliche Zuschläge ergaben u. a. folgende wichtige Ergebnisse.

Die durch die verschiedenen Mörtel erzeugten Expansionsdrücke als Folge einer Dehnungsbehinderung verhalten sich sehr ähnlich zu den Längenänderungen bei einer freien Dehnung. Es konnte bei den Untersuchungen ein Korrelationskoeffizient von 0,95 ermittelt werden. Eine Ausnahme bildeten hier nur alkalireiche Mörtel. Trotz großer freier Dehnungen blieben deren erzeugte Drücke verhältnismäßig klein, was nach KAWAMURA auf die geringere Viskosität von AK-Gelen mit hohen Alkaligehalten zurückgeführt werden kann. Weiterhin konnte festgestellt werden, dass die Expansionsdrücke tendenziell mit der Menge des entstandenen Gels anstiegen. Eine direkte Korrelation war hier jedoch nicht gegeben und auch hier bildeten einige alkalireiche Gele eine Ausnahme. Durch parallel durchgeführte Analysen der Porenlösungen wurde außerdem gezeigt, dass mit zunehmendem Alkaligehalt im Mörtel auch der Alkalianteil des Gels steigt bzw. bei ausreichend vorhandenem reaktiven  $\text{SiO}_2$  die Gelmenge zunimmt und sich damit wiederum der Expansionsdruck erhöht. Unter Zuhilfenahme der vorgenannten Ergebnisse und einer vereinfachten Modellvorstellung

versuchten KAWAMURA und IWAHORI aus dem global gemessenen Expansionsdruck verschiedener Mörtelprismen auf einen lokalen Geldruck um das einzelne Gesteinskorn zu schließen. Das Modell beruhte dabei grundsätzlich auf der Annahme, dass in den feinen Rissen des Gesteinskorns eine AKR auftritt, Gel gebildet wird, anschließend eine Rissaufweitung stattfindet und dies beim Zusammenwirken mehrerer reaktiver Körner im Mörtel zur gemessenen Dehnung bzw. dem gemessenen Druck führt (siehe Abb. 3.3.12 links). Bei der Modellierung wurde das Gesteinskorn als eine expansionsfähige Kugel in einer nicht expansionsfähigen Matrix dargestellt (Abb. 3.3.12 rechts).

Für sehr kleine Gelmengen kann nach [34] der Expansionsdruck eines Mörtelprismas durch folgende Gleichung ausgedrückt werden:

$$P_0 = 3 * P \left( \frac{1 - \mu}{2} \right) * \Delta V_G \quad \text{mit}$$

$P_0$  = globaler Expansionsdruck  
 $P$  = lokaler Expansionsdruck  
 $\mu$  = Querdehnzahl des Mörtels  
 $\Delta V_G$  = erzeugte Gelmenge (Volumenanteil)

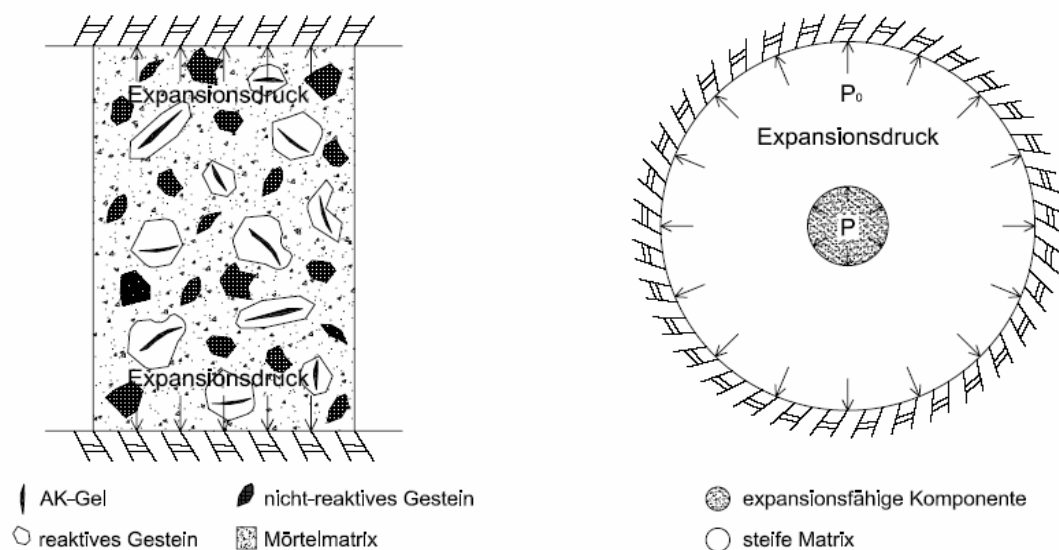


Abbildung 3.3.12: schematische Darstellung zur globalen (links) und zur lokalen (rechts) Expansionsdruckentstehung für das Zwei-Phasen-Modell nach KAWAMURA (Quelle: [34] S.140)

Die Variable  $P_0$ , welche eigentlich dem entstehenden Druck bzw. der Spannung bei einer dreidimensionalen Verformungsbehinderung entspricht, wird hier stark vereinfachend durch die bei einer einaxialen Dehnungsbehinderung erzeugte Spannung  $\sigma_0$  ersetzt. Der Wert  $\sigma_0$  ergibt sich dabei aus dem gemessenen Expansionsdruck  $\sigma$  (Abb. 3.3.12) und einem Anteil  $\Delta\sigma$ , der die Dehnung des Stahlrahmens (Abb. 3.3.11) und weitere geräteabhängige Faktoren berücksichtigt. Die Gleichung zur Bestimmung des lokalen Expansionsdruckes lautet damit wie folgt:



$$P = \frac{\sigma_0}{3 * \Delta V_G * \left( \frac{1 - \mu}{2} \right)}$$

mit  $\sigma_0 = \sigma + \Delta\sigma$

Es wird offensichtlich, dass  $P$  vom Anstieg der Regressionsgeraden ( $\sigma_0/\Delta V_G$ ), d. h. dem Grad der Erhöhung des Expansionsdruckes bei einer Gelvolumenzunahme abhängig ist.

Auf diese Art und Weise berechnete lokal entstehende Expansionsdrücke des Gels sollen nach [34] unter Einbeziehung der Messergebnisse – man erhielt unter Berücksichtigung von  $\Delta\sigma$  globale Drücke  $\sigma_0 \leq 8 \text{ N/mm}^2$  – theoretisch Größenordnungen von über  $350 \text{ N/mm}^2$  erreichen. Diese extrem hohen Werte, welche sogar einem Mehrfachen des möglichen osmotischen Drucks entsprechen, können jedoch nach KAWAMURA in der Praxis infolge von Entlastungserscheinungen nicht erreicht werden. So werden beispielsweise die hier verwendeten Bedingungen einer steifen umgebenden Matrix nicht erfüllt und Kriechverformungen nicht berücksichtigt. Außerdem stellt das Modell durch die Verwendung der einaxial ermittelten Dehnungswerte eine extreme Vereinfachung dar.

### osmotische Zelle

Die osmotische Zelle stellt eine relativ simple Methode dar, Flüssigkeitsdrücke zu messen, welche beim Vorhandensein einer semi-permeablen Membran entstehen können. In der Literatur werden zahlreiche Versuche mit derartigen Zellen beschrieben, wobei sich der Aufbau der Apparaturen prinzipiell ähnelt (Abb. 3.3.13). Die Hauptunterschiede liegen in der Umsetzung der semipermeablen Bedingungen. So verwendeten VERBECK und GRAMLICH Anfang der 50er Jahre hierfür eine dünne Scheibe aus erhärtetem Zementstein [26], während WEN zu Beginn seiner Forschungen zum osmotischen Druck eine dichte Keramik, deren Poren zusätzlich mit einem Alkali-Silikat-Gel gefüllt wurden, nutzte [77]. SIDERIS schaffte teildurchlässige

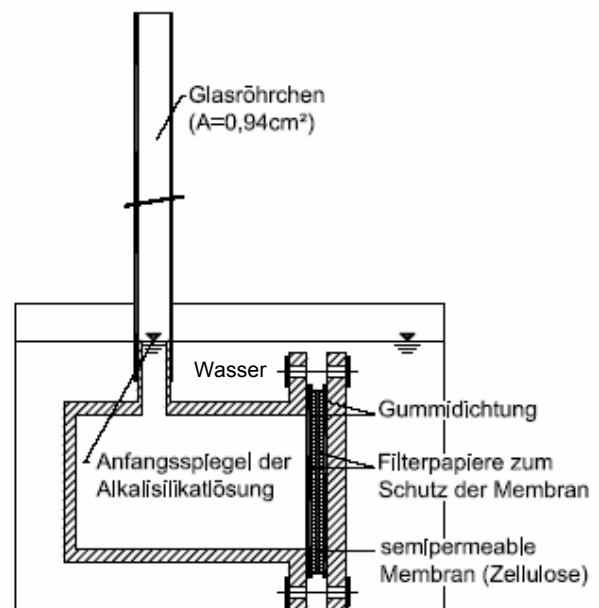


Abbildung 3.3.13: Aufbau einer osmotischen Zelle nach SIDERIS (Quelle: [62] S.509)

Bedingungen mit Hilfe einer künstlich hergestellten Zellulosemembran [62], die heutzutage durch sehr hochwertige Gewebe z. B. aus feinsten Acetatfasern, Polysulfonfasern oder Polyvinylfasern ersetzt werden kann. Bei der hier dargestellten osmotischen Zelle wurde der innen liegende Behälter mit einer Alkali-Silikat-Lösung gefüllt, während sich im äußeren Gefäß reines Wasser befand. Ein Flüssigkeitsaustausch erfolgte nur durch die teildurchlässige Zellulosemembran, wobei keine Alkali-Silikat-Lösung austreten, aber weiteres Wasser hinein gelangen konnte. Eine Zunahme des Druckes ließ sich durch den Anstieg des Wasserspiegels im Glasröhrchen ablesen.

### **Expansionsmessung nach Struble und Diamond**

1981 stellten STRUBLE und DIAMOND ihre Quellform zur Bestimmung eines freien Quellens und eines Quellens unter definierter Last vor [71]. Sie beschreiben das prinzipielle Quellverhalten von Natriumsilikat-Gelen in der von ihnen entwickelten Quellform. Messergebnisse von vier verschiedenen Natriumsilikathydraten werden vorgestellt, wobei jeweils das freie Quellen und ein Quellen unter Last angegeben sind. Während der Messungen mussten STRUBLE und DIAMOND feststellen, dass unter bestimmten Lastverhältnissen die untersuchten Gele zur Auflösung neigten und somit kein Quellen zeigten. Insgesamt gehen aus diesen Untersuchungen keine direkten Zusammenhänge zwischen Gelzusammensetzung und Quellverhalten hervor.

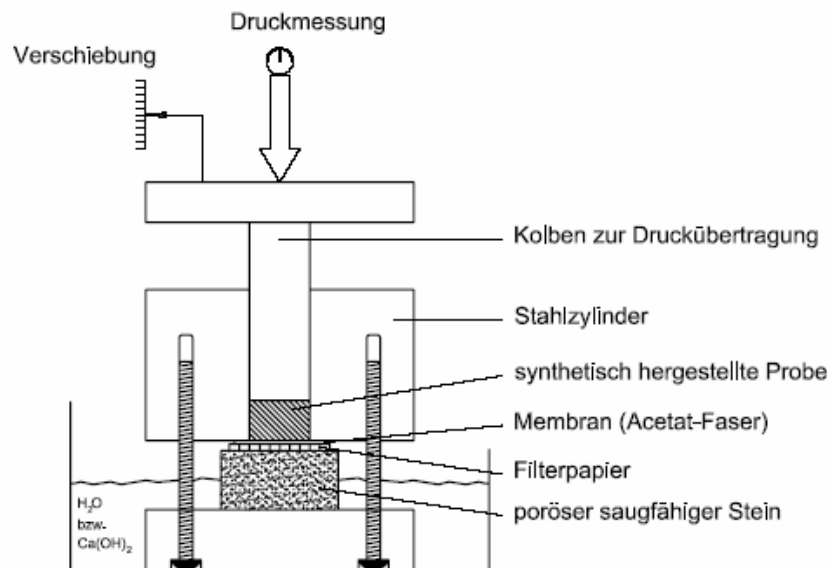


Abbildung 3.3.14: Versuchsaufbau für Quellmessungen (Quelle: [77] S. 613])

### **„Sol-Gel Expansion“ – Methode nach YIN und WEN**

Eine sehr flexible Methode zur Bestimmung von Expansionsdrücken synthetischer AK-Gele stellt das Prüfverfahren von YIN und WEN dar. Die dafür entwickelte Apparatur (siehe Abb. 3.3.14) basiert auf der von STRUBLE und DIAMOND entwickelten Quellform [71] und kann sowohl für die Quelldruckbestimmung als auch – durch den Einsatz einer semi-permeablen Acetat-Faser – für Messungen zum osmotischen Druck verwendet werden.

Als Hauptziel sehr aktueller Untersuchungen in [77], [80] galt die Verifizierung der Quelldrucktheorie bzw. der Theorie des osmotischen Druckes. Von Bedeutung war dabei vor allem die Herstellung der künstlichen Gele, die in ihren Eigenschaften den im Beton vorkommenden entsprechen sollten. Hierfür wurden reaktionsfähige Sole (= Dispersionszustand von Teilchen) mit variierenden SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O – Verhältnissen hergestellt, indem man eine 0,7 molare NaOH-Lösung mit amorphem SiO<sub>2</sub> mischte und bei Raumtemperatur vollständig reagieren ließ. Als pessimal ergab sich letztendlich ein Verhältnis SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O von 4,75 [77], [80].

Um betonähnliche Verhältnisse zu schaffen, wurde Ca(OH)<sub>2</sub> bzw. NaCl als Geliermittel hinzugegeben und so ein AK-Gel aus dem Sol ausgefällt. Diesem wurde dann mit Hilfe einer

Vakuumpumpe und Trockenmittel die Feuchte entzogen. Die entstandene Probenmasse wurde bis zum Untersuchungstag in einem Behälter unter Hochvakuum und mit Trockenmittel aufbewahrt. Um eine identische Porosität zu erhalten, erfolgte eine Mahlung jeder getrockneten Probe, von der 1 g des Durchgangs durch ein 0,5 mm Sieb für 30 min bei  $32,5 \text{ N/mm}^2$  zu einer 3 ...4 mm dicken Tablette ( $\varnothing 1,539 \text{ mm}$ ) gepresste wurde.

Durch die Zufuhr von Wasser bzw. einer Calciumhydroxidlösung über den porösen Stein, der infolge einer Kapillarwirkung die Gleichmäßigkeit der Wasserzufuhr gewährleisten soll, beginnt die Gelprobe sich je nach Zusammensetzung mehr oder weniger auszudehnen. Der Kolben bewegt sich nach Überwindung der Eigenlast aufwärts und so erzeugte Verschiebungen und Expansionsdrücke können durch eine Kraftmessdose bzw. einen Drucksensor aufgenommen und an einen Computer weitergeleitet werden. Wird zwischen Stein und Probekörper neben den Filterpapierlagen eine semipermeable Membran gebracht und wurde der Kolben äußerst exakt in den Stahlzylinder eingepasst, ist es möglich, auch osmotische Drücke zu messen. Selbst nach einer eventuellen Auflösung des Probekörpers können die Ionen nicht zurück in das Gefäß gelangen, aber weiterhin  $\text{H}_2\text{O}$  oder  $\text{Ca(OH)}_2$  hinzutreten.

Anhand vergleichender Untersuchungen zwischen gemessenen Quelldrücken und osmotischen Drücken gehen YIN und WEN davon aus, dass die gefügezerstörende Expansion nicht durch das Quellen von AK-Gelen erzeugt werden kann. Einerseits neigten die mittels NaCl ausgefällten Gele zur starken Wasseraufnahme und damit Verflüssigung sowie zur schnellen Karbonatisierung bei  $\text{Ca(OH)}_2$  – Zugabe in den Flüssigkeitsbehälter, andererseits zeigten mittels  $\text{Ca(OH)}_2$  ausgefällte, d. h. calciumhaltige Gele, dass sie kaum bzw. gar nicht quellfähig sind. Wurden hingegen osmotische Bedingungen geschaffen, konnten trotz der geringen Prüfkörpergröße Expansionsdrücke bis  $8,68 \text{ N/mm}^2$  [80] gemessen werden, was für normale Betone aber auch diverse Gesteine bereits die Überschreitung der Zugfestigkeit bedeuten würde. Inwieweit in der Nähe des reaktiven Gesteinskorns die Voraussetzungen für osmotische Vorgänge erfüllt werden können, wurde neben weiteren Untersuchungsergebnissen bereits in Abschnitt 3.2 dargestellt.

### 3.4 Entstehung und Besonderheiten von Alkali-Kieselsäure-Gelen

Wie in Abschnitt 3.1 bereits gezeigt wurde, sind die prinzipiell ablaufenden Vorgänge zur Entstehung von Alkali-Kieselsäure-Gelen bekannt. Bestimmte kieselsäurehaltige Zuschläge reagieren mit den Alkali- und Hydroxidionen der Porenlösung zu Alkali-Silikat-Komplexen, welche in der Lage sind mehr oder weniger große Mengen an Wasser aufzunehmen und dadurch irreversible Expansionen im Beton hervorzurufen. Details, wie z. B. der Einfluss des Calciums auf die Eigenschaften der Gele, der zeitliche Ablauf der Gelbildung und die genaue Ursache und Höhe der Expansionsdrücke blieben jedoch bisher trotz umfangreicher Studien weitestgehend ungeklärt (man beachte beispielsweise die verschiedenen Schadenstheorien).

#### Gelzusammensetzungen

Analysen von Gelausscheidungen AKR-geschädigter Betone, die aufgrund der äußerst geringen Probenmengen nur im elektronenmikroskopischen Bereich erfolgen können (Kernresonanz-NMR-Untersuchungen, EDX, usw.), ergeben stets selbst innerhalb eines Bauteils stark variierende Ergebnisse, die nicht selten die ganze Bandbreite an möglichen Zusammensetzungen widerspiegeln. Neben dem Gelalter und damit verbundenen Umwandlungsprozessen spielen hier hauptsächlich der Kontakt und die Entfernung zum reaktiven Gesteinskorn und dem Zementstein eine Rolle. So zeigten Untersuchungen in [20] [73], dass sich die Calcium-Gehalte bei engem Kontakt zur Zementsteinmatrix mit zunehmendem Betonalter und steigender Entfernung zum reaktiven Gesteinskorn erhöhten (Die Gele sind jedoch nach [20] nicht identisch). Gleiche Ergebnisse erhielt u. a. CHATTERJI als er die Ca – Gehalte der Reaktionsprodukte punktuell vom Inneren einzelner Körner bis in den umgebenden Zementstein hinein untersuchte [12]. Dass bereits einzelne übereinander liegende Gelschichten mit zunehmender Entfernung zum Zementstein geringer werdende Ca – Gehalte aufweisen können, wurde z. B. am FIB Weimar [47][46] an einem Gel in einer Luftpore nachgewiesen (siehe Abb. 3.4.1 und 3.4.2), Tab. 3.4.1).

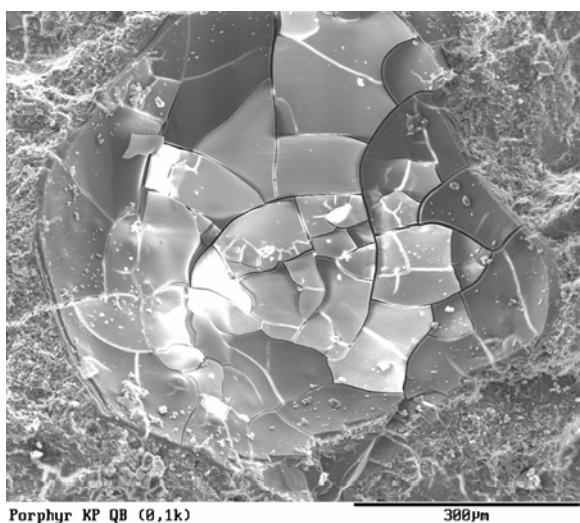


Abbildung 3.4.1: trockenes schollenartig gebrochenes Gel in einer Luftpore, AKR-geschädigter Beton mit Porphyr als reaktive Gesteinskörnung

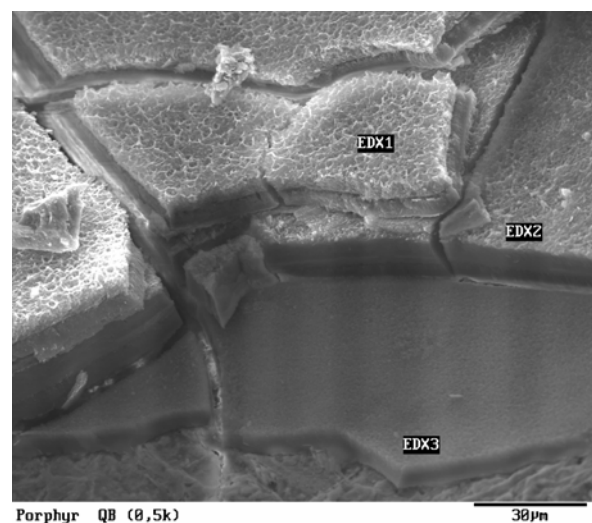


Abbildung 3.4.2: Gelschichten, deren Zusammensetzungen sich mit zunehmenden Abstand vom Zementstein ändern (außen: mehr glasiges Gel, innen: eher dichtes Gel)

Tabelle 3.4.1: EDX-Analyseergebnisse der einzelnen Gelschichten (Quelle: [46] S.43) und eine mittlere Zusammensetzung aus > 100 Analysen (Quelle: [20] S. 2-720)

Oxide in %	EDX 1	EDX 2	EDX 3	Mittel aus >100 Analysen
Na <sub>2</sub> O	3,6	2,0	-	4,3
K <sub>2</sub> O	3,1	1,4	0,9	11,6
CaO	41,5	47,7	47,6	27,8
SiO <sub>2</sub>	51,6	47,7	48,2	56,9
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	1,3	3,3	-
Total	100,0	100,0	100,0	100,6

Wie auch die Gelanalysen in Tabelle 3.4.1 zeigen, können die Alkaliegehalte ebenfalls stark z. B. infolge von partiellen Auslaugungs- und Umwandlungsprozessen variieren. Von Bedeutung ist hier vor allem die Anwesenheit von Ca(OH)<sub>2</sub> in der Porenlösung. Ob jedoch ein einfacher Austausch von Alkali-Ionen (Na<sup>+</sup> bzw. K<sup>+</sup>) durch Ca<sup>+</sup> - Ionen erfolgt, bedarf noch intensiveren Untersuchungen [28].

Dass diese Analyseergebnisse aber noch in einem weitaus stärkeren Maße streuen können, zeigen die aus zahlreichen Angaben in der Literatur zusammengefassten Verhältnisse von (Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O) / SiO<sub>2</sub> = 0,05 ... 0,60 und (CaO + MgO) / SiO<sub>2</sub> = 0,0 ... 0,20 in [28].

Die Eigenschaften stark beeinflussend und damit besonders wichtig für das Quellverhalten der Gele sind der Alkalianteil und die Menge des eingebundenen Calciums. Es gilt als sicher, dass mit zunehmendem Alkaligehalt die Fähigkeit Wasser aufzunehmen steigt und die Viskosität des Gels sinkt [26], [33]. KAWAMURA erweiterte dies nach Untersuchungen zum Expansionsdruck um den Zusatz: „erst ab einer bestimmten kritischen Alkalikonzentration im Gel“ [34]. Außerdem geht er davon aus, dass Gele mit sehr hohen Alkaligehalten keinen Quelldruck, sehr wohl aber einen osmotischen Druck aufbauen können. Dass Unterschiede zwischen dem Quellverhalten natrium- bzw. kaliumreicher Gele vorhanden sind, d.h. zum Beispiel die kaliumhaltigen Gele stärker zu Auflösungserscheinungen neigen und niedrigere Dehnungen hervorrufen, wurde in [79] und [67] gezeigt.

Die Rolle des Calciums stellt sich insgesamt als sehr kontrovers dar. Einerseits geht man davon aus, dass das Calcium Gele mit geringen Quellkapazitäten erzeugt (in der Literatur wird häufig ein oberer Grenzwert von ca. 30 % CaO für die Quelfähigkeit angegeben.) und somit die schädigende Wirkung der AKR reduziert, andererseits scheint Calcium aber auch notwendig zu sein, um überhaupt ein quellfähiges Gel bilden zu können [74], [28]. Eine bedeutende Theorie zum Aufbau von AKR-Gelen ist das HELMUTH – STARK – Modell, in dem davon ausgegangen wird, dass das Gel eine Art Zwei-Komponenten-Mischung darstellt, welche aus alkaliärmeren C-N-S-H – Phasen und alkalireicheren N-S-H – Phasen besteht. Die beiden Phasen sind dabei in ihrer jeweiligen Zusammensetzung nahezu konstant (C-N-S-H: Na<sub>2</sub>O = 6,6 %, SiO<sub>2</sub> = 40 %, CaO = 52,6 % ; N-S-H: Na<sub>2</sub>O = 17 %, SiO<sub>2</sub> = 83 %) und nur ihre Anteile im Gel variieren. Mit einer Zunahme der C-N-S-H – Phasen sollen aufgrund der Bildung stabiler Strukturen und einer Verringerung des N / S - Verhältnisses die Viskosität sowie der Quelldruck des Gels steigen [28], [34]. Bestätigt wurde eine solche Annahme u. a. bei Expansionsdruckmessungen von KAWAMURA wie Abb. 3.4.3 zeigt [34].



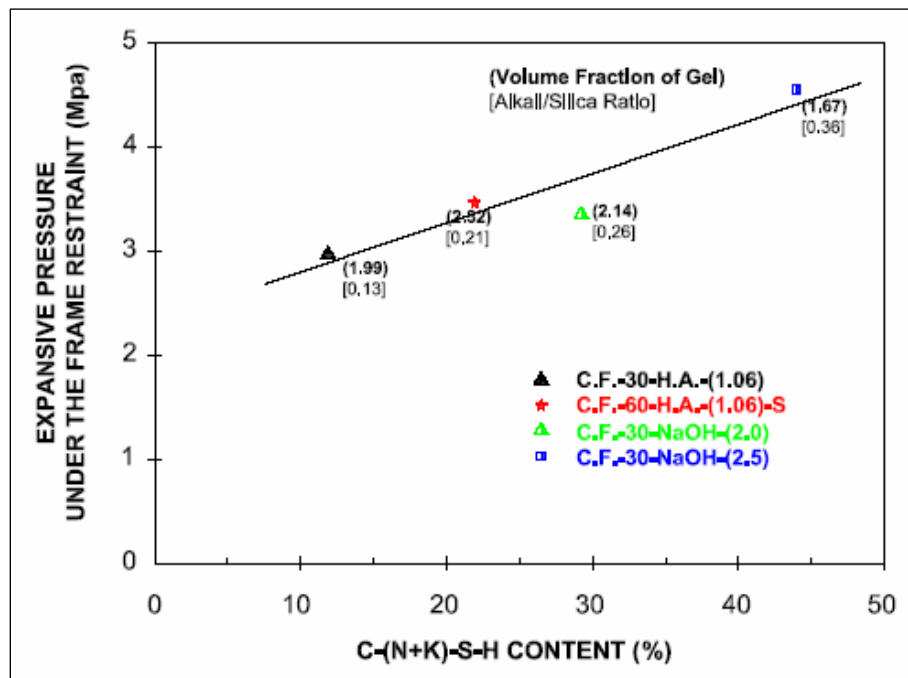


Abbildung 3.4.3: Beziehung zwischen Expansionsdruck und C-(N+K)-S-H – Anteil in ASR-Gelen bei Gelgehalten von ca. 2 % (Quelle: [34] S. 137), C.F. = calcined flint, H.A. = high alkali

## Gelstrukturen

Einen großen Streitpunkt stellt immer wieder die Struktur der Alkali-Kieselsäure-Gele dar. Von völlig strukturlosen Gelen, die Expansionsdrücke nur unter osmotischen Bedingungen erzeugen können [77], [80], bis hin zu Schichtsilikat-Strukturen mit einem Quellverhalten, was in etwa dem von Tonmineralen entspricht [79], wird berichtet. Als eine entscheidende Ursache können hier offensichtlich die verschiedenen Untersuchungsbedingungen und Untersuchungszeitpunkte sowie die damit stark variierenden Gelzusammensetzungen genannt werden:

Während man WIEKER und seiner Theorie [79], dass auftretende Dehnungen im Beton durch eine Aufnahme von Wasser in die Zwischenräume von Alkali-Schichtsilikaten hervorgerufen werden, in der Vergangenheit immer wieder entgegenhielt, es seien bisher nur amorphe nicht quellfähige Alkalisilikate vorgefunden worden, zeigen mittlerweile mehrere XRD- und SEM-Analysen, dass Gele durchaus zumindest partiell geordnete Schichtstrukturen aufweisen können [28], [75]. Auch am FIB Weimar wurden kristalline Zusammensetzungen in expansionsfähigen Gelen nachgewiesen [45]. Quellvorgänge könnten dann folgendermaßen erklärt werden.

Bei einem entstandenen Na-Schichtsilikat werden die negative Ladungen tragenden Silikatschichten durch positiv geladene  $\text{Na}^+$  – Ionen zusammengehalten. Tritt Wasser hinzu, kommt es zur Dissoziation, d. h. Trennung der negativ geladenen  $\equiv\text{SiO}^-$  – Gruppen von den  $\text{Na}^+$  – Ionen, wobei sich letztere mit einer Hydrathülle (aus  $\text{H}_2\text{O}$  – Molekülen) umgeben. Dies führt zu einer Reduzierung der nach außen wirkenden positiven Ladung. Als Folge werden die negativ geladenen Silikatschichten elektrostatisch stärker abgestoßen – der Schichtenabstand vergrößert sich [79]. Verstärkt werden diese Vorgänge noch, wenn mit  $\text{OH}^-$  – Ionen NaOH

gebildet wird, was dann weiteres vorhandenes reaktives  $\text{SiO}_2$  in Schichtsilikate überführen kann. Grundlage für die Aufstellung dieser Theorie waren Untersuchungen mit  $\delta\text{-Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$ , welches mit reaktivem  $\text{SiO}_2$  gemischt wurde und bei Zufuhr von Feuchte Kanemit ( $\text{NaH}[\text{Si}_2\text{O}_5] \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) bildete. Bei diesem auch natürlich vorkommenden Mineral konnte röntgenografisch eine quellfähige Schichtstruktur nachgewiesen werden.

### **möglicher Ablauf einer AK-Gelbildung im Beton**

Nachfolgend soll anhand der Forschungsergebnisse von HOU, STRUBLE und KIRKPATRICK [28] ein möglicher Ablauf der Gelbildung infolge einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion beschrieben werden. Diese Theorie, welche nach einer Simulation der Reaktionsabläufe und intensiven Untersuchungen der zeitlichen Veränderungen von  $\text{Na(K)-S-H}$  – bzw.  $\text{C-S-H}$  – Zusammensetzungen und –Strukturen aufgestellt wurde, steht dabei im Großen und Ganzen im Einklang mit den wichtigsten Schadensmodellen (siehe 3.3) sowie zahlreichen Forschungsergebnissen.

Demnach werden mit Beginn der Zementhydratation die normalen Hydratationsprodukte gebildet, d. h. unter anderem auch die anfänglich noch relativ ungeordneten im Anfangsstadium einer Polymerisation befindlichen  $\text{C-S-H}$  – Phasen. Hauptsächlich sulfatisch gebundene Alkalien gehen in Lösung, Hydroxidionen beginnen reaktive Gesteinskörner oberflächlich anzugreifen und lösen so  $\text{SiO}_2$ . Dieses reagiert dann mit  $\text{Ca(OH)}_2$ , bis das lokal verbraucht ist zu weiteren wenig polymerisierten  $\text{C-S-H}$  – Phasen. Diese Vorgänge entsprechen im Wesentlichen einer puzzolanischen Reaktion.

Sind die Zementbestandteile so zu einem Großteil umgesetzt, reagiert die weitere frei werdende Kieselsäure mit den existierenden Calciumsilikathydraten, wobei jetzt  $\text{Si}$  – reichere stärker polymerisierte  $\text{C-S-H}$  – Phasen entstehen. Diese Vorgänge laufen so lange ab, bis eine Art maximaler Silicat-Gehalt der Calciumsilikathydrate erreicht wird. Steigt der Anteil des  $\text{SiO}_2$  in der Porenlösung weiter, beginnt erst dann eine Gelierung von Alkalisilikathydraten. Mit fortschreitender Zeit entwickeln diese  $\text{Na(K)-S-H}$  – Phasen aus einem anfänglichen Netzwerk polymerisierter Anionen im Nanobereich eine Struktur mit schichtenförmigem Aufbau, wahrscheinlich sogar begleitet von einer signifikanten kreuzweisen Vernetzung. Wenn das gebildete AK-Gel nun in der Lage ist, seinen Ursprungsort zu verlassen (z. B. Ausfließen des Gels aus dem Gesteinskorn) bzw.  $\text{Ca(OH)}_2$  zum Gel gelangt, kann dieses zu einem  $\text{Ca}$  – reicheren und  $\text{Si}$  – ärmeren  $\text{C-Na(K)-S-H}$  – Komplex umgewandelt werden (entspricht z. B. dem POWERS/ STEINOUR – Modell).

### **3.5 mathematische Modelle und Computersimulation**

Nach weltweiter intensiver Forschungsarbeit an Laborbetonen und -mörteln wurde vor allem in den letzten Jahren vermehrt der Versuch unternommen, Teilbereiche oder den Gesamtprozess der Betonschädigung infolge einer AKR mit Hilfe von Computerprogrammen zu simulieren. So ist auch bei der 12. ICCAR im Oktober 2004 in Peking die Anzahl der vorgestellten Arbeiten auf diesem Gebiet stark angestiegen. Über meist vereinfachte mathematische bzw. mechanische Modelle wurde versucht, Dehnungsreaktionen von Probekörpern oder ganzen Betonbauteilen sowie die Entstehung von Rissen zu beschreiben. Bei der numerischen Umsetzung stellten sich dann z. B. Berechnungen mittels der Finite-

Elemente-Methode (FEM) als sehr erfolgsversprechend dar, weil oftmals gute Korrelationen zu den natürlichen Abläufen erreicht werden konnten.

In [22][21] wurde beispielsweise mit Hilfe eines 3d-FEM-Modells, in dem Temperatur- und Feuchteinflüsse berücksichtigt werden, eine sehr gute Annäherung zwischen berechneten und über 25 Jahre gemessenen Verschiebungen an der Oberkante eines Staudammes erreicht. Des Weiteren war man in der Lage, Labortests zu Dehnungsvorgängen an zylinderförmigen Probekörpern zu simulieren. Der Vergleich zwischen der gemessenen Schädigung eines Betonbalkens und einer FEM-gestützten Vorhersage über einen Zeitraum von 400 Tagen in [56] zeigte trotz einer Unterschätzung ebenfalls, dass prinzipiell durch geeignete Modelle Prognosen zur Schadensentwicklung getroffen werden können.

Auf Details zu diversen Modellansätzen und weiteren numerischen Simulationen, die sich mit der Kinetik ablaufender chemischer Reaktionen und damit verbundenen Diffusionsprozessen zur Abschätzung des Quellverhaltens, der Konzentrationsentwicklungen usw. beschäftigen, soll im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter eingegangen werden.



### 3.6 Zusammenfassung und offene Fragen

Durch die Literaturrecherche konnte gezeigt werden, dass die prinzipiellen Abläufe der Alkali-Kieselsäure-Reaktion sowie die beeinflussenden Größen weitestgehend bekannt sind. Alkalien, die aus dem Zement stammen bzw. zusätzlich von Außen eingebracht werden, reagieren mit bestimmten reaktives  $\text{SiO}_2$  enthaltenden Gesteinskörnungen abhängig von Korngröße und Menge unter der Bildung expansionsfähiger AK-Gele. Gewisse Temperatur- und Feuchtigkeitsbereiche wirken dabei reaktionsfördernd, was man sich z. B. in diversen zeitraffenden Laborprüfmethode zur Bestimmung gefährdeter Gesteinsarten zunutze macht. Neben der Auswahl geeigneter Zemente (NA) kann auch der Einsatz von Zusatzstoffen den Verlauf und den Schädigungsgrad einer AKR beeinflussen, wobei hier allerdings noch weitere vergleichende Untersuchungen zwischen im Labor und im Freien gelagerten Betonen notwendig sind.

Eine AKR im erhärteten Beton führt zu Dehnungen und bei Behinderung von diesen zu Expansionsdrücken, welche stark abhängig vom Betongefüge sowie der Menge und den Eigenschaften der entstandenen Gele sind.

Die in Abschnitt 2 aufgestellten Fragen können nach der hier durchgeführten Literaturrecherche nicht zufriedenstellend beantwortet werden, insbesondere die genauen Abläufe vom Einsetzen der Gelbildung bis hin zu den zahlreichen betonabhängigen Umwandlungsprozessen konnten noch nicht ausreichend geklärt werden. Eng damit verbunden ist auch die Unsicherheit über die Struktur der Gele und wie es bei Feuchteaufnahme zur Expansion und damit entstehenden Entlastungsrissen in Gestein und Mörtelmatrix kommt.

Welcher Vorgang zerstört die Gesteinskörner bzw. das Betongefüge? Können Quellspannungen durch Wasseraufnahme die Schadensursache sein?

Sowohl für die Gültigkeit der Quelldrucktheorie als auch für die Theorie des osmotischen Druckes konnten Hinweise gefunden werden. In den vorgestellten Schadenstheorien kann festgestellt werden, dass einige Autoren die Bildung einer semipermeablen Membran (Schicht) um das Gesteinskorn als Voraussetzung für das Abfließen einer AKR ansehen, andere Modelle jedoch diese Membranbildung nicht beschreiben. Die Entstehung des Quelldrucks, der zur Aufspaltung des Korns und dann zur Schädigung des Betons führt, ist weitgehend unklar. Somit können diese Fragen nach der Literaturschau als unbeantwortet gelten.

Welche Druckspannungen werden bei der Reaktion im Gefüge erreicht? Welche Druckspannungen sind nötig, um das Betongefüge aufzureißen?

Während durch mikroskopische Aufnahmen (siehe auch Abschn. 3.4 und 4) offensichtlich wird, dass die Gele gefügezerstörende Kräfte entwickeln müssen, erreichten die Maximalwerte verschiedenster Expansionsdruckmessungen jedoch sowohl bei synthetisch hergestellten Gelen als auch bei AKR-geschädigten Mörteln und Betonen nur selten die Zugfestigkeiten von Gesteinskorn bzw. Matrix. Probleme bei der Synthetisierung von Gelen, den verwendeten Prüfmethode oder auch bei der Einschätzung des Widerstandes von Gestein und Mörtelmatrix sind hier mögliche Ursachen. Auch die Fragen zu den entstehenden bzw. benötigten Druckspannungen sind weiterhin nicht beantwortet und sollen somit als Motivation für diese Arbeit dienen.

## 4 Untersuchungen zur Struktur und Zusammensetzung von AK-Gelen in Mörtel- und Betonproben

Anhand von Mörtel- und Betonproben, bei denen eine Alkali-Kieselsäure-Reaktion initiiert wird, sollen Informationen über die Struktur und Zusammensetzung der Reaktionsprodukte gewonnen werden. Diese Untersuchungen stellen neben den AKR-Schadensfällen die Grundlage für die Herstellung der synthetischen Gele dar.

### 4.1 Mörtelproben im Mörtelschnelltest (Magdeburger Schnelltest)

Für diese Untersuchungen wurden Mörtelprismen 40 x 40 x 160 mm in Anlehnung an DIN EN 196-1 hergestellt, die den Anforderungen des Schnelltests der LMPA Magdeburg entsprechen, der in seiner durch das FIB modifizierten Form als Alternativverfahren zum Schnelltest nach Alkali-Rili 2007 angewendet werden kann. Die Mörtelrezeptur stellte sich demnach wie folgt dar:

Prüfzement ( $\bar{N} = 1,3 \pm 0,1 \%$ ):	450 g
Wasser:	225 g
Gesteinskörnung:	1350 g
Gesamt - Na <sub>2</sub> O-Äquivalent:	2,5 M -% (Prüfzement + Natronlauge)

Die Gesteinskörnung setzte sich folgendermaßen zusammen:

1350 g	--> 450 g Normsand	0,1 mm – 0,5 mm
	--> 450 g Prüfmateri	0,5 mm – 1,0 mm
	--> 450 g Prüfmateri	1,0 mm – 2,0 mm

Für die Versuche standen folgende Gesteine zur Verfügung. Aus einem oberrheinischen Kies Stressquarz und Kieselkalk, ein Rhyolith aus Großsteinberg sowie ein Kieselschiefer aus dem Kieswerk Boxberg, wo dieser ebenfalls Bestandteil des dort geförderten Kieses ist. Als alkaliinaktives Referenzmaterial soll ein Diabas aus Ostthüringen unterstützende Vergleichswerte liefern. Dem Kieselschiefer kann eine schädigende Alkaliempfindlichkeit nachgewiesen werden, da bei Bauwerken die unter anderem mit diesem Kieselschiefer erstellt wurden (BAB 5, verschiedene Brücken etc.), AKR – Schäden, die auf den Einsatz dieser Gesteinskörnung zurück zu führen sind, auftraten. Auch bei der Verwendung der anderen Gesteinsarten (Stressquarz, Rhyolith und Kieselkalk) sind Schadensfälle bekannt.

Die technischen Daten des verwendeten Zementes CEM I 32,5R sind im Anhang nachzulesen.

### **Lagerung und Dehnungsmessung**

#### **Lagerung**

Die im Schnelltest geforderte Überwasserlagerung bei 70°C wurde in einer Modifikation des FIB durch Lagerung in einer dicht verschlossenen Glaswanne im Trockenschrank realisiert.

## Dehnungsmessung

Die Länge der Prismen wird mit Hilfe eines Setz- / Dehnungsmessers nach Graf/Kaufmann bei 20 °C gemessen.

### **Licht- und Rasterelektronenmikroskopie**

Um für die Auflichtmikroskopie der Versuchskörper repräsentative Proben jeder Gesteinsart zu finden, wurden alle Prüfkörper nach Ablauf der Versuchsdauer von 28 Tagen makroskopisch untersucht. Dabei wurde nicht auf einzelne Besonderheiten geachtet, sondern vielmehr auf solche Merkmale, die bei den jeweiligen Gesteinskörnungen bei jedem Prisma zu finden waren. Von den Proben wurden von den Oberflächen und den frisch angefertigten Querbrüchen auffällige Reaktionsprodukte unter dem Auflichtmikroskop in Augenschein genommen.

### **Versuchsergebnisse**

Im Verlauf der Dehnungsmessungen waren an den Prismen, bei denen Kieselkalk und Kieselschiefer als Gesteinskörnungen verwendet wurden, bereits 7 Tage nach ihrer Herstellung, d. h. nach 6 Tagen Lagerung bei 70 °C und 100 % rel. F. weiße Flecken auf der Oberfläche zu erkennen.

Im weiteren Verlauf der Dehnungsmessung zeigten sich auch auf den anderen Prismen erst kleine weiße Punkte, die sich allmählich zu größeren relativ runden Flecken ausdehnten. In Abbildung 4.1.1 sind diese Flecken auf den Prismen zu erkennen. Bei Verwendung von Diabas als Gesteins-



Abbildung 4.1.1: Prismen Kieselkalk mit weißen Flecken auf der Oberfläche

körnung waren solche Flecken nicht sichtbar. Bei einigen Prismen war während der Messung außerdem eine glitzernde Schicht zu erkennen. Beide oberflächlich erkennbaren Veränderungen sollen mit Hilfe der Lichtmikroskopie und ggf. mit REM sowie EDX genauer untersucht werden.

Das Dehnungsverhalten der untersuchten Gesteinskörnungen kann grob in zwei Varianten eingeteilt werden. Wie in Abbildung 4.1.2 zu erkennen ist, steigen die Dehnungswerte von Kieselschiefer und Kieselkalk zunächst rasch an und nähern sich schließlich einem Grenzwert. Auffällig bei diesen beiden Kurven ist ein Knick nach 14 bzw. 16 Tagen Lagerung. Die zweite Variante der Dehnung ist eine relativ kontinuierliche Längenzunahme. Eine eventuelle Annäherung an einen Grenzwert kann bis zum Zeitpunkt des Versuchsendes nicht festgestellt werden. Quarz und Rhyolith haben eine erheblich größere Dehnung erfahren als der Diabas. Die größte Dehnung zum maßgebenden Messtermin nach 28 Tagen wurde bei den Prismen nachgewiesen, bei denen Kieselschiefer als Gesteinskörnung eingesetzt wurde. Sie betrug 2,74 mm/m. Die Referenzmessung mit Diabas als Gesteinskörnung ergab eine Dehnung von 0,54 mm/m und ist somit als nicht alkalireaktiv einzuschätzen. Es findet im Grunde lediglich eine hygrische Dehnung statt.

### Längenänderung

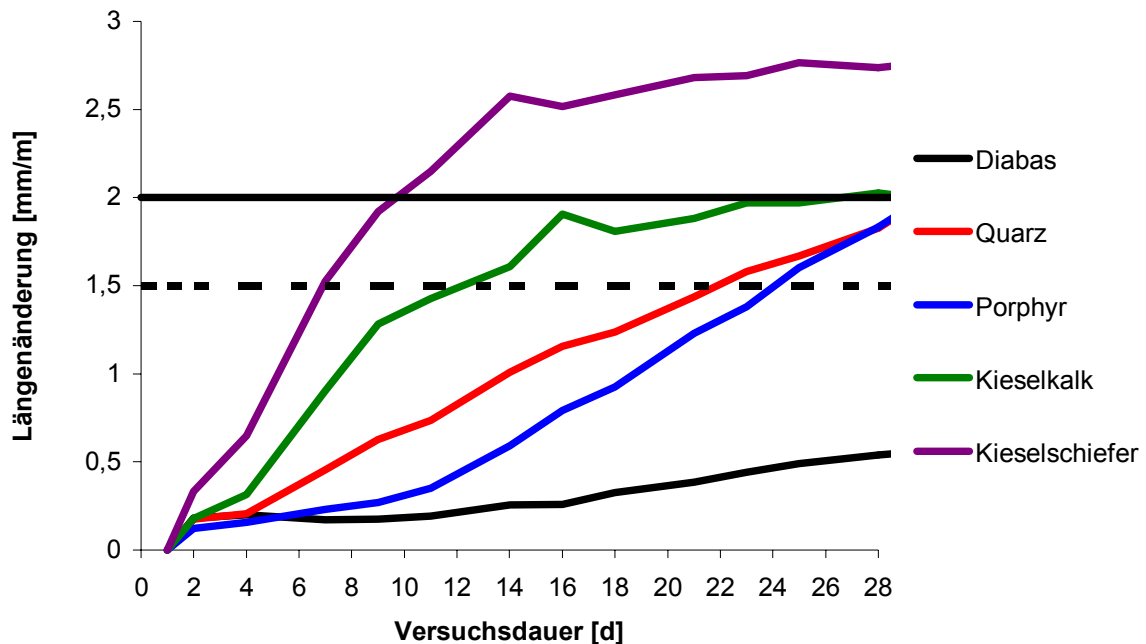


Abbildung 4.1.2: Dehnungsverläufe der Prismen im MST

### Lichtmikroskopie

#### Diabas

Der Diabas gilt als alkaliinaktiv. Dies bestätigen sowohl die gemessenen Dehnungen als auch das Nichtvorhandensein von Reaktionsprodukten einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion in den Bruchflächen und Dünnschliffen.

#### Stressquarz

Aus den Dehnungsmessungen konnte für den Stressquarz die Einstufung bedingt alkalireaktiv getroffen werden. Um bei diesen Prismen Hinweise auf eine AKR zu finden, wurden Oberflächen und Bruchflächen der Prismen unter dem Auflichtmikroskop untersucht. Bei den Prismen hat sich insbesondere auf der abgestrichenen Seite eine relativ dicke weiße Kruste gebildet. An einigen Stellen dieser Oberflächenseite waren auch die schon makroskopisch sichtbar glasig glänzenden Ausblühungen erkennbar. In entstanden Fehlstellen lässt sich ebenfalls die schollenartige Rissstruktur erkennen. Bei Luftporen in der Bruchfläche lässt sich eine glasige Schicht an der Porenwand ausmachen, Abbildung 4.1.3



Abbildung 4.1.3: Luftpore in Bruchfläche Prisma Stressquarz (lichtmikroskopische Aufnahme); 25-fache Vergrößerung, Marke = 500 µm



## Rhyolith

Bei den Dehnungsmessungen konnten nach 28 Tagen beim Rhyolith in etwa gleich große Dehnungswerte wie beim Stressquarz nachgewiesen werden. Somit ist auch dieser Rhyolith den bedingt alkalireaktiven Gesteinen zuzuordnen. Hinweise auf eine vollzogene AKR soll die Auflichtmikroskopie der Oberflächen sowie der Bruchflächen der Probekörper liefern. Makroskopisch war bei den Prismen keine so ausgeprägte Kruste an der abgestrichenen Seite der Prismen festzustellen. Im Gegensatz zum Stressquarz sah diese weiße Kruste nicht schollenförmig gebrochen aus, sondern eher wie übereinander gefallene Platten. Bei Betrachtung der Bruchflächen wurden vor allem in größeren Luftporen teils glasige, teils milchig trübe Schichten auf der Porenwand festgestellt (Abbildung 4.1.4). Hier ist auch die für eine AKR typische schollenartige Rissstruktur deutlich zu erkennen.



Abbildung 4.1.4: Milchig-trübe Porenwand in Bruchfläche Prisma Rhyolith (lichtmikroskopische Aufnahme); 25-fache Vergrößerung, Marke = 500 µm

## Kieselkalk

Nach Kieselchiefer wiesen die Prismen mit Kieselkalk nach 28 Tagen die größten Dehnungen auf. An den Oberflächen der Prismen waren, wie schon bei Stressquarz und Rhyolith weiße Beläge zu erkennen, die unter dem Auflichtmikroskop eindeutige AKR – Strukturen (schollig gebrochen) erkennen ließen; Abbildung 4.1.5. In den Bruchflächen waren an den Porenwänden ebenfalls glasige Schichten zu sehen. Außerdem waren einige Luftporen – ähnlich einer halb vollen Rohrleitung - mit einem dichten weißen Reaktionsprodukt gefüllt; Abbildung 4.1.6. Inwieweit es sich bei dieser Neubildung möglicherweise um ein Alkali-Silikat-Gel handelt, muss die EDX-Analyse zeigen.



Abbildung 4.1.5: Schollig gebrochener Belag auf Oberfläche Prisma Kieselkalk (lichtmikroskopische Aufnahme), 25-fache Vergrößerung, Marke = 500 µm

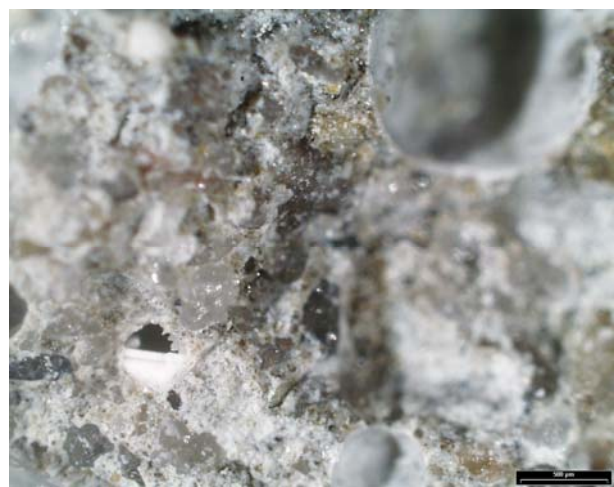


Abbildung 4.1.6: Poren in Bruchfläche Prisma Kieselkalk (lichtmikroskopische Aufnahme); 25-fache Vergrößerung, Marke = 500 µm

## Kieselschiefer

Bei Betrachtung der Probekörper mit Kieselschiefer konnten die meisten und deutlichsten Reaktionsprodukte beobachtet werden. Dieser Umstand deckt sich mit den größten Dehnungswerten dieser Prismen. Die oberflächlichen Neubildungen ähnelten mit ihrer eher flockigen Form denen, die schon beim Rhyolith zu finden waren. In den Bruchflächen konnte bei fast allen Poren die schon beim Kieselkalk festgestellte „halbvolle Rohrleitung“ ausgemacht werden; siehe Abbildung 4.1.7. Das bedeutet das Gel hat sich in den Poren je nach Lage der Probekörper ausnivelliert. Häufig waren hier auch solche Poren direkt neben einem Zuschlagskorn anzutreffen. So kann man davon ausgehen, dass – falls die EDX-Analyse die Existenz eines Alkali - Silikat - Geles nachweist – dieses Gesteinskorn für die Bildung des weißen Reaktionsproduktes zumindest mit verantwortlich ist. In allen Poren konnte die glasige Schicht auf der Porenwand eindeutig wahrgenommen werden.



Abbildung 4.1.7: Luftpore in Bruchfläche Prisma Kieselschiefer (lichtmikroskopische Aufnahme), 25-fache Vergrößerung, Marke = 500 µm

Zusammenfassend lässt sich aus den Beobachtungen der Auflichtmikroskopie festhalten, dass die Häufigkeit der lichtmikroskopisch erkennbaren AKR – Produkte weitestgehend mit den Ergebnissen der Dehnungsmessung übereinstimmten. Auffällig ist, dass die Prismen mit Kieselkalk und Kieselschiefer nicht nur die größten Dehnungen zeigten, sondern dass sich hier eine besondere Form der Reaktionsprodukte (teilweise gefüllte Poren) ausbildete. Die Ursache müsste, da verschiedene  $\text{SiO}_2$  – Quellen den einzigen Unterschied zwischen den Prismen darstellen, im Vorhandensein unterschiedlicher  $\text{SiO}_2$  – Modifikationen liegen. Die verschiedenen Modifikationen unterscheiden sich möglicherweise hinsichtlich ihrer Stabilität und damit ihrem Vermögen, mit anderen Elementen eine Verbindung einzugehen. Im Kieselschiefer, Kieselkalk und im Rhyolith befindet sich Feinquarz, im Kieselkalk auch Chalcedon, in den hier untersuchten Quarzproben Quarze mit unterschiedlichem Strainzustand.



## REM und EDX-Analyse

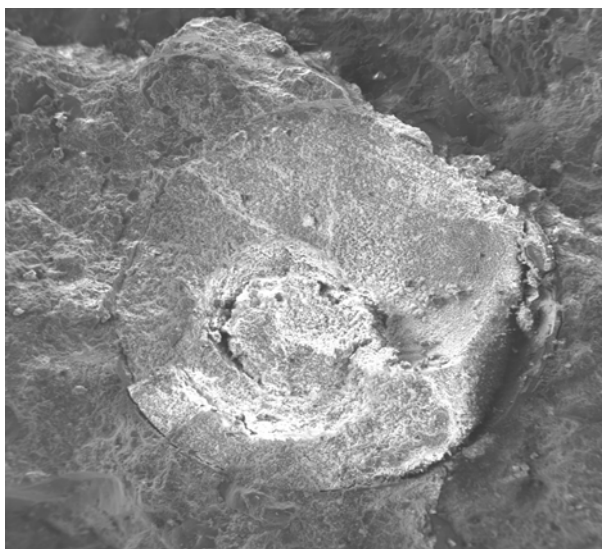
Bei diesen Untersuchungen wurden die in der Lichtmikroskopie gefundenen markanten Merkmale noch einmal mit der durch das REM gegebenen Auflösung untersucht. Außerdem sollte die oxidische Zusammensetzung der Phasen bestimmt werden. Dabei ist bei diesen Proben mit erhöhten Natriumgehalten durch die Zugabe der Natronlauge zu rechnen.

### Diabas

Da die Proben mit Diabas als Gesteinskörnung keine Reaktionen hinsichtlich einer AKR zeigten, wurden keine weiterführenden Untersuchungen mit der Rasterelektronenmikroskopie durchgeführt.

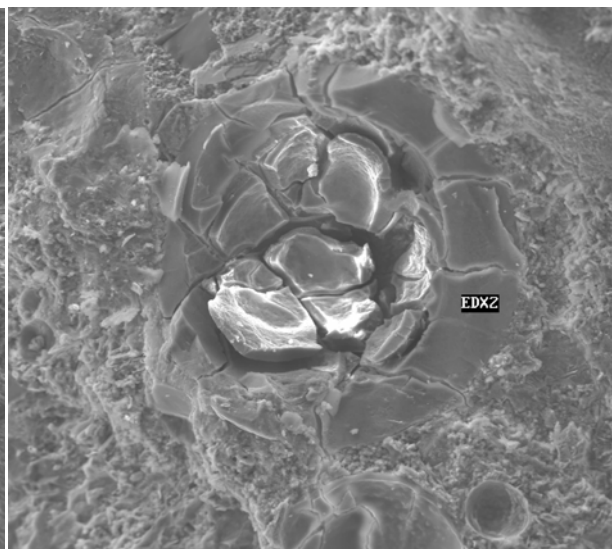
### Stressquarz

Da die Lichtmikroskopie der Bruchflächen der Probekörper in Bezug auf die aufgetretenen Dehnungen kein zufrieden stellendes Ergebnis brachte, wurden genauere Untersuchungen mit dem REM durchgeführt. So konnten zum einen komplett gefüllte (Abbildung 4.1.8) und auch halb gefüllte Poren (Abbildung 4.1.9) nachgewiesen werden. Im Gegensatz zu den unter



Quarz QB AKR (0,05k)

Abbildung 4.1.8: Vollgefüllte Pore in Bruchfläche Prisma Stressquarz (REM – Aufnahme)



Quarz QB AKR (0,25k)

Abbildung 4.1.9: Teilweise zugewachsene Pore in Bruchfläche Prisma Stressquarz (REM – Aufnahme)

Verwendung von Kieselkalk und Kieselschiefer hergestellten Prismen füllt das Alkali-Silikat-Gel die Pore vom Rand nach innen, als ob die Pore zuwachsen würde. Die Ausbildung der ausnivellierten Flüssigkeit, ähnlich der „halb vollen Rohrleitung“ ist hier nicht erkennbar. Die oxidische Zusammensetzung des in Abbildung 4.1.9 gezeigten Gels mit glasig glatter Struktur ist gekennzeichnet von einem hohen Calciumoxid – Gehalt und relativ geringen Mengen an Alkalien.

Die Freisetzung der weniger stark gebundenen Alkalien verursacht die Bildung eines aus dichteren, C-S-H ähnlichen – Phasen, bestehenden Reaktionssaums.

Tabelle 4.1.1: oxidische Zusammensetzung EDX 2

Oxide	EDX 2
Na <sub>2</sub> O [%]	3,22
K <sub>2</sub> O [%]	3,17
CaO [%]	43,84
SiO <sub>2</sub> [%]	44,84
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [%]	2,73
Total [%]	97,80

## Rhyolith

Die in Abbildung 4.1.4 dargestellte Pore zeigt Abbildung 4.1.10 als REM – Aufnahme. An dieser Pore lässt sich ein schichtartiger Aufbau des Gels nachweisen. Abbildung 4.1.11 zeigt die unterschiedlichen Schichten, die zugehörige oxidische Zusammensetzung jeder Schicht ist in Tabelle 4.1.1 aufgezeigt.

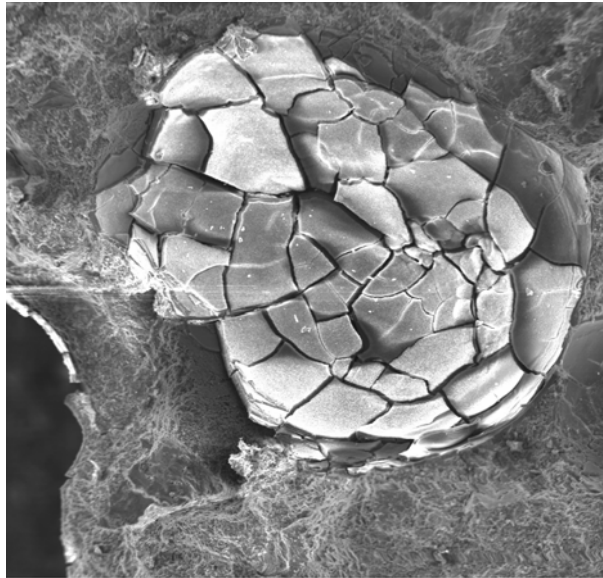


Abbildung 4.1.10: Mit Alkali – Silikat – Gel bedeckte Porenwand in Bruchfläche Prisma Rhyolith (REM – Aufnahme)

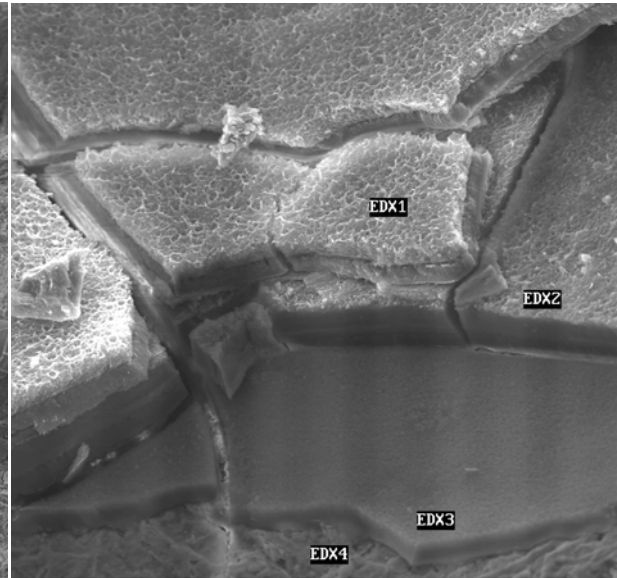


Abbildung 4.1.11: schichtartiger Aufbau des Alkali – Silikat – Gels

Tabelle 4.1.1: oxidische Zusammensetzung unterschiedlicher Schichten (Abb. 4.1.11)

Oxide	EDX 1	EDX 2	EDX 3
Na <sub>2</sub> O [%]	3,64	1,96	---
K <sub>2</sub> O [%]	3,14	1,38	0,92
SiO <sub>2</sub> [%]	51,60	47,70	48,22
CaO [%]	41,53	47,67	47,59
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [%]	---	1,29	3,28
Total [%]	100,00	100,00	100,00

Der Alkaligehalt der Schichten nimmt vom Inneren der Pore zur Mörtelmatrix hin ab. In der untersten Schicht ist kein Natriumoxid mehr nachweisbar. Zur Porenwand hin nehmen der Gehalt an Siliciumdioxid ab und der von Calciumoxid zu. In den randnäheren Schichten ist außerdem zunehmend Aluminiumoxid nachweisbar. In diesen Randschichten kann von einer Bildung von dichteren C-S-H - ähnlichen Phasen ausgegangen werden.

## Kieselkalk

Die bereits bei der Lichtmikroskopie auf der Oberfläche festgestellten schollig gebrochenen Ausblühungen, die schon eindeutig einer AKR zugeordnet werden konnten, sollen in den weiteren Betrachtungen außen vor gelassen werden. Interessanter scheinen die Ergebnisse,

die sich bei Untersuchung der Bruchflächen der Prismen zeigten. Abbildung 4.1.12 zeigt die schon in Abbildung 4.1.6 erkennbare halb gefüllte Pore unter dem Rasterelektronenmikroskop bei 100-facher Vergrößerung.

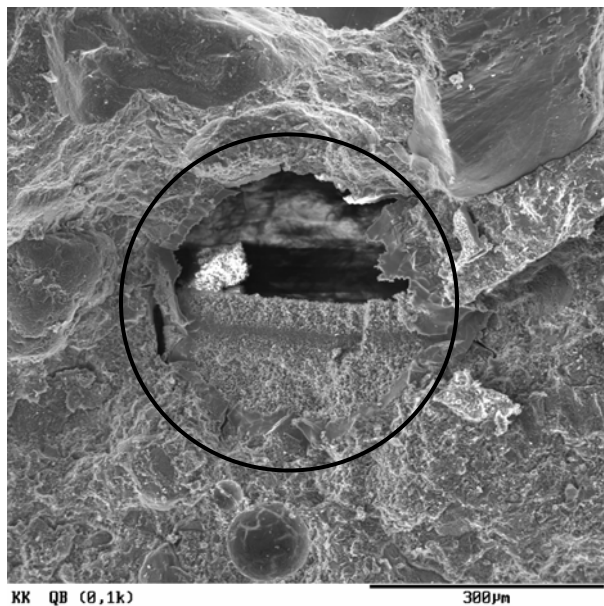


Abbildung 4.1.12: Halb gefüllte Pore in Bruchfläche Prisma Kieselkalk

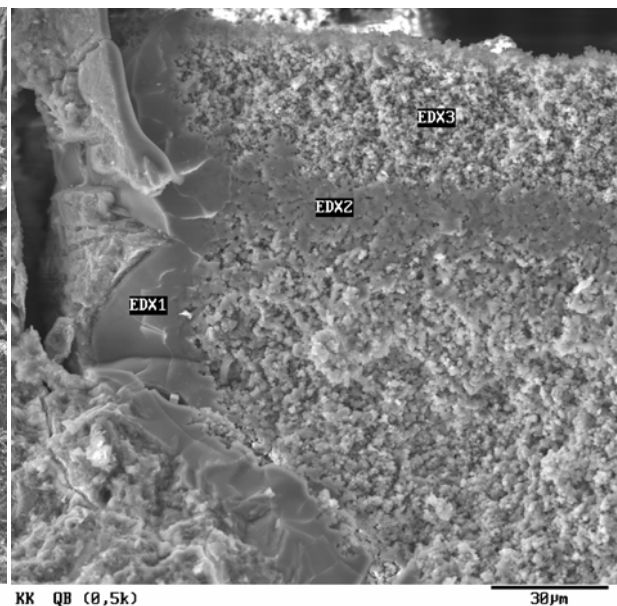


Abbildung 4.1.13: Unterschiedliche Schichten der halb gefüllten Pore in Bruchfläche Prisma

Deutlich zu erkennen ist, dass sich die in Abbildung 4.1.6 als dichte weiße Substanz gezeigte Ausscheidung in unterschiedliche Schichten einteilt. Bei noch höherer Vergrößerung ist außerdem der schon bei allen anderen betrachteten Prismen festgestellte glasige Rand der Pore sichtbar, Abbildung 4.1.13. Eine EDX – Analyse aller erkennbaren Schichten soll mögliche Unterschiede in ihrer Zusammensetzung aufzeigen. Die wichtigsten Daten der EDX – Analysen 1, 2 und 3 sind in Tabelle 4.1.2 einzusehen.

Tabelle 4.1.2: oxidische Zusammensetzung der unterschiedlichen Schichten der halb gefüllten Pore (Abb. 4.1.13)

Oxid	EDX1	EDX2	EDX3
Na <sub>2</sub> O [%]	9,73	12,47	10,62
K <sub>2</sub> O [%]	10,08	10,62	10,37
CaO [%]	14,37	10,38	9,71
SiO <sub>2</sub> [%]	65,82	66,53	69,30
Total [%]	100,00	100,00	100,00

Wie schon bei den oben betrachteten Prismen hat die dichte glasige Schicht an der Porenwand (EDX 1) einen höheren Anteil Calciumoxid. Die Anteile an Siliciumdioxid sowie an Alkalien sind geringer. Die porösen Schichten, die in den bis jetzt betrachteten Prismen noch aussahen, als seien sie auf der glasigen Schicht aufgewachsen, haben sich hier auf Grund der Lagerung am „Boden“ der Pore ähnlich einer Flüssigkeit ausnivelliert. Die weniger porös aussehende Zwischenschicht, die fast ein bisschen glasig-verlaufen aussieht (EDX 2), weist einen deutlich höheren Gehalt an Natriumoxid auf und im Gegensatz zur benachbarten porösen Schicht weniger Siliciumdioxid.



Andere Poren zeigen, wie in Abbildung 4.1.14 deutlich wird, vorwiegend die Strukturausbildungen des AKR – Gels, wie sie bei den Prismen mit Stressquarz und Rhyolith zu erkennen waren.

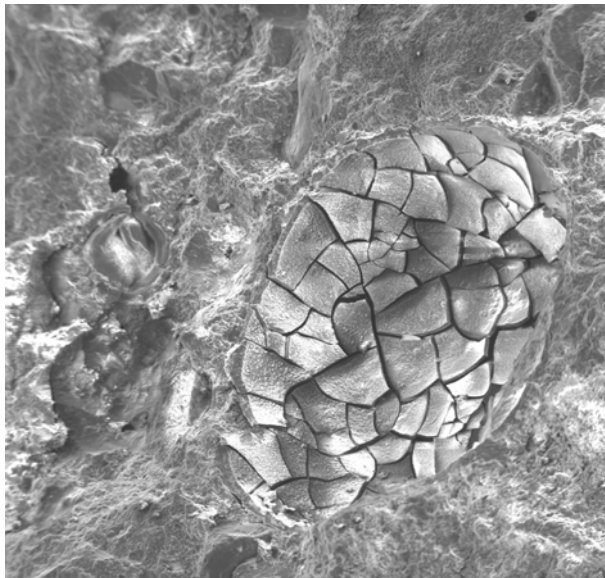


Abbildung 4.1.14: Alkali – Silikat – Gel in Poren in Bruchfläche Prisma Kieselkalk (REM – Aufnahme)

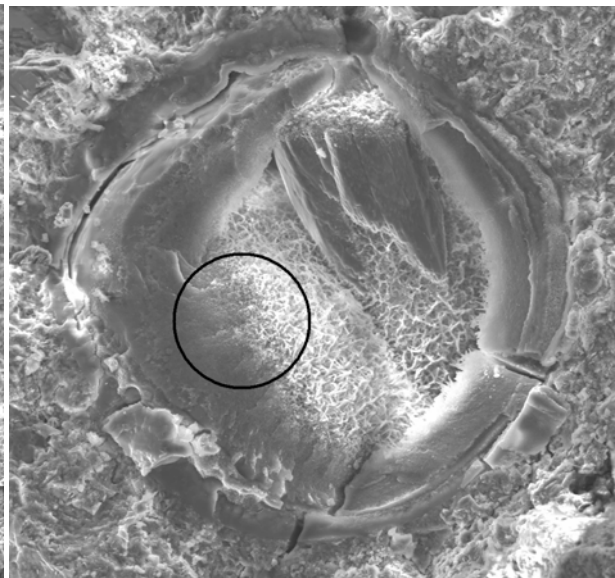


Abbildung 4.1.15: Fast vollständig zugewachsene Pore in Bruchfläche Prisma Kieselkalk

Für die Analysen der oxidischen Zusammensetzung der in den Prismen gefundenen Alkali – Silikat – Gele soll der fast vollständig zugewachsenen Pore links in Abbildung 4.1.14 besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden. Die 300fache Vergrößerung dieser Pore zeigt Abbildung 4.1.15. Die hier erkennbaren Unterschiede in der Strukturausbildung (im Kreis gekennzeichnet) sollen für eine EDX – Analyse herangezogen werden. Im Gegensatz zu den Strukturen der halb voll gelaufenen Pore, Abbildung 4.1.12 und Abbildung 4.1.13, zeigen sich diese in Abbildung 4.1.16 nicht so knollig – gedungen sondern eher nadelig-filigran. Die wichtigsten Daten der EDX – Analyse der verschiedenen Strukturen sind in Tabelle 4.1.3 zusammengefasst.

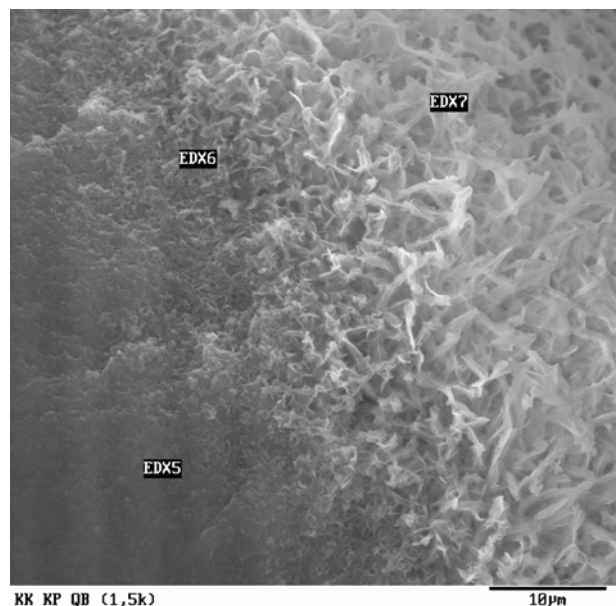


Abbildung 4.1.16: Unterschiedliche Strukturen der fast vollständig zugewachsenen Pore in Bruchfläche Kieselkalk (REM – Aufnahme)

Tabelle 4.1.3: oxidische Zusammensetzung unterschiedlicher Strukturen der fast vollständig zugewachsenen Pore  
Abb. 4.1.16

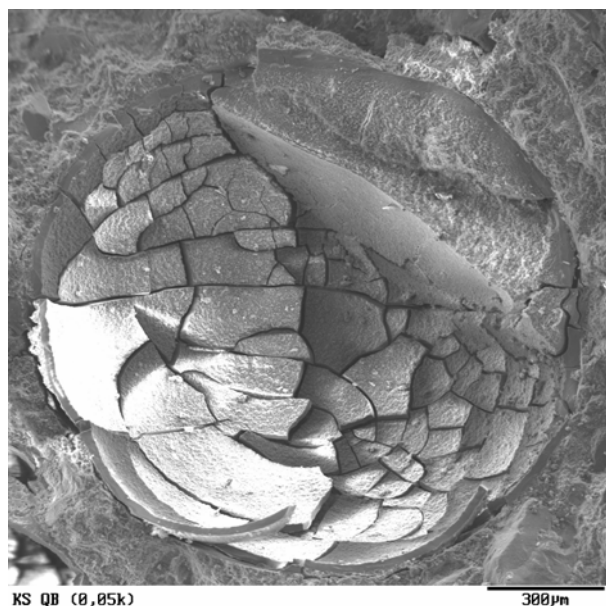
Oxid	EDX 5	EDX 6	EDX 7
Na <sub>2</sub> O [%]	4,44	3,06	2,90
K <sub>2</sub> O [%]	4,22	2,54	2,31
CaO [%]	45,89	43,68	48,86
SiO <sub>2</sub> [%]	43,43	50,72	45,39
Total [%]	97,98	100,00	99,46

Bei der Auswertung der oxidischen Zusammensetzung der einzelnen Strukturen konnte in dieser Pore keine Tendenz festgestellt werden. Bei den vorangegangenen Untersuchungen waren bei den Alkaligehalten in Richtung Porenwand immer Rückgänge zu erkennen. In diesem Fall nimmt der Alkaligehalt in Richtung Porenninneres ab. Für alle anderen nachgewiesenen Oxide konnte keine Kontinuität festgestellt werden.

Im Vergleich zu den Zusammensetzungen der Strukturen der teilweise vollgelaufenen (EDX 1,2 und 3) und den fast vollständig zugewachsenen (EDX 5,6 und 7) Poren fallen der Calciumoxid- und der Alkalien – Gehalt auf. Der deutlich erhöhte Calciumoxid – Gehalt (EDX 5,6 und 7) ist höchstwahrscheinlich auf die Anwesenheit des Portlandits (oben Mitte Abbildung 4.1.15) zurückzuführen. Der Gehalt an Alkalien ist in der zugewachsenen Pore deutlich geringer als in der teilweise vollgelaufenen Pore.

### Kieselschiefer

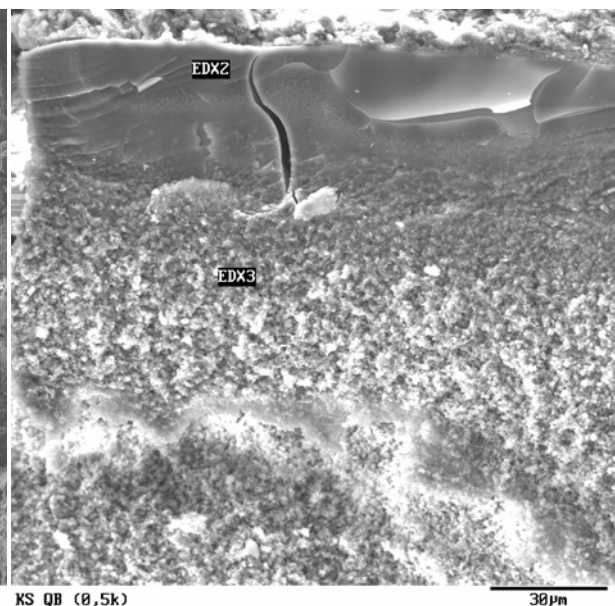
Eine Aufnahme mit dem REM bei 50facher Vergrößerung einer teilweise vollgelaufenen Pore zeigt Abbildung 4.1.17. Eine Schichtung der dichten weißen Reaktionsprodukte, wie sie in Abbildung 4.1.13 zu erkennen ist, kann hier nicht ausgemacht werden. Die höhere Auflösung



KS QB (0,05k)

300µm

Abbildung 4.1.17: Luftpore in Bruchfläche Prisma Kieselschiefer (REM – Aufnahme)



KS QB (0,5k)

30µm

Abbildung 4.1.18: Unterschiedliche Strukturausbildung der Reaktionsprodukte der Pore in Bruchfläche Prisma Kieselschiefer (REM – Aufnahme)

in Abbildung 4.1.18 zeigt lediglich die schon häufig beobachtete Ausbildung der glasigen Schicht am Rand zur Mörtelmatrix sowie ein relativ porös aussehendes Produkt im Inneren der Pore.

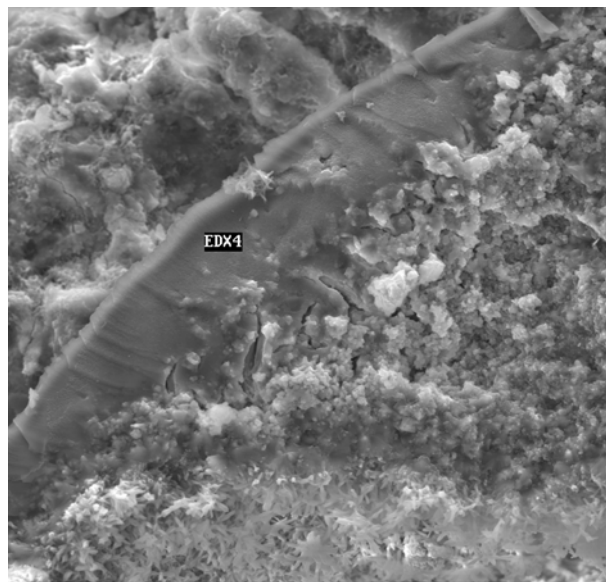
Die Analyse der oxidischen Zusammensetzung dieser zwei unterschiedlichen Strukturen ist kurz in Tabelle 4.1.4 zusammengefasst.

Tabelle 4.1.4: oxidische Zusammensetzung unterschiedlicher Gelstrukturen Kieselsteine (Abb. 4.1.18)

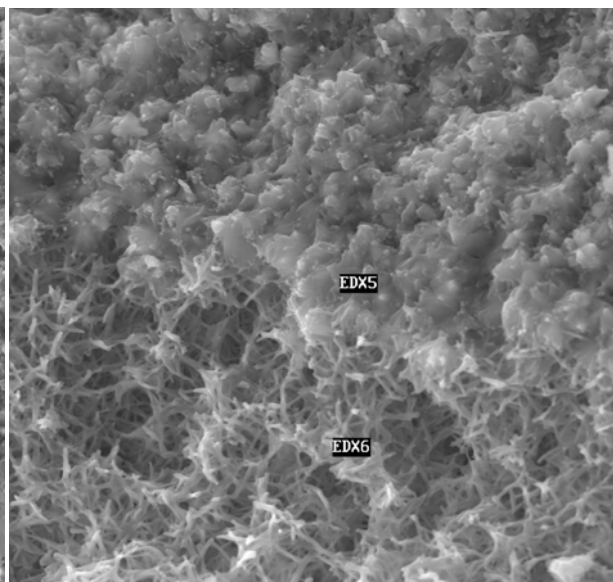
Oxid	EDX 2	EDX 3
Na <sub>2</sub> O [%]	6,44	6,33
K <sub>2</sub> O [%]	8,81	10,43
CaO [%]	21,56	16,53
SiO <sub>2</sub> [%]	63,18	66,71
Total [%]	100,00	100,00

Wie schon in den anderen Analysen festgestellt, weist die dichte glasige Schicht im Gegensatz zu der porös wirkenden Substanz einen höheren Calciumoxid – Gehalt und einen geringeren Siliciumdioxid- sowie Alkalien – Gehalt auf. Der Anteil an Natriumoxid bleibt annähernd konstant und der Anteil an Kaliumoxid verringert sich.

An anderer Stelle bei gleicher Grundsituation – glasiger Rand und porös wirkende füllende Neubildung (Abbildung 4.1.19) – konnte wiederum eine Schichtung der porösen Reaktionsprodukte beobachtet werden. Die Betrachtung der unterschiedlichen Schichten mit



KS KP QB (1k)  
Abbildung 4.1.19: Schichtung des porös wirkenden füllenden Reaktionsproduktes einer Pore in Bruchfläche Prisma Kieselsteine (REM – Aufnahme)



KS KP QB (2k)  
Abbildung 4.1.20: Strukturunterschiede der Schichtungen der Pore in Bruchfläche Prisma Kieselsteine (REM – Aufnahme)

erhöhter Vergrößerung machte deutliche Strukturunterschiede sichtbar; Abbildung 4.1.20.

Deutlich zu unterscheiden sind die kompakter wirkenden Ausbildungen am oberen Bildrand zu den großmaschig verzweigten stäbchen- bzw. nadelförmigen Strukturen am unteren Bildrand. Die Ursache dieser unterschiedlichen Strukturausbildungen sollte mit Hilfe der EDX –



Analysen gefunden werden. Die wichtigsten Analyseergebnisse sind in Tabelle 4.1.5 zusammengefasst.

Tabelle 4.1.5: oxidische Zusammensetzung unterschiedlicher Strukturen in Pore Kleinstprisma Kieselchiefer

Oxid	EDX 4	EDX 5	EDX 6
Na <sub>2</sub> O [%]	11,18	8,02	4,90
K <sub>2</sub> O [%]	8,75	10,36	11,72
CaO [%]	17,17	15,56	17,65
SiO <sub>2</sub> [%]	62,90	66,06	65,14
Total [%]	100,00	100,00	99,41

Der Unterschied in den oxidischen Zusammensetzungen der glasigen (EDX 4) und der mehr oder weniger porös wirkenden (EDX 5 und EDX 6) Schichten, wie er bei vorangegangenen Analysen festgestellt wurde, konnte an dieser Stelle nicht bestätigt werden. Der sonst geringere Alkali – Gehalt der glasigen Schicht ist an dieser Messstelle knapp 20 % höher als bei den porös wirkenden Strukturen. Auch die sonst deutlichen Unterschiede beim Calciumoxid – Gehalt können hier nicht festgestellt werden. Ein Vergleich der zwei mehr oder weniger porös wirkenden Schichten zeigt, dass sich der Natriumoxid – Gehalt von der sich eher kompakt darstellenden Struktur zur filigran wirkenden Struktur knapp um die Hälfte verringert. Kaliumoxid- und Calciumoxid – Gehalt nehmen ein wenig zu. Außerdem konnte in der filigraner, hohlraumreicher wirkenden Struktur Aluminiumoxid in geringen Mengen nachgewiesen werden.

Bei Betrachtung der Tabellen 4.1.1 bis 4.1.5 wird deutlich, dass die Zusammensetzung der Gele für jede verwendete Gesteinskörnung unterschiedlich ist. Auch innerhalb einer Gesteinskörnung treten zwischen den verschiedenen Erscheinungsformen des Gels zum Teil große Unterschiede in der Zusammensetzung auf. Selbst in einer gefundenen Gelprobe kann die Zusammensetzung im µm-Bereich je nach Analyseposition stark schwanken, so steigen tendenziell der CaO-Gehalt von Porenmitte in Richtung Porenwand und der SiO<sub>2</sub>-Gehalt in Richtung eines nahe liegenden Gesteinskorns.

Sucht man in Hinblick auf die unterschiedlich großen Dehnungswerte Ursachen, so fallen zunächst die Gelausbildungsorte auf. Außer beim Diabas konnten bei allen anderen Gesteinskörnungen die im Inneren des Prismas entstandenen AKR – Gele nachgewiesen werden. In analoger Reihenfolge zu der Größe der auftretenden Dehnungen (Rhyolith – Stressquarz – Kieselkalk und Kieselchiefer) treten auch häufiger die porös aussehenden Gele auf. Auffälligstes Merkmal der Dehnungsintensität scheint jedoch der Anteil an Calciumoxid zu sein (siehe Tabelle 4.1.1 bis Tabelle 4.1.5 rot hinterlegt). In [15] wird als Grenzwert für das Quellverhalten eines AKR – Gels 30 % CaO notiert. Für die Gesteinskörnungen Kieselkalk und Kieselchiefer, die auch die größten Dehnungen aufwiesen, liegt der CaO – Anteil ihrer Gele sowohl in den glasig dichten als auch in den porös wirkenden Erscheinungsformen unter diesem Grenzwert von 30 %. In dem Prisma, in dem Stressquarz als Kieselsäurelieferant eingebracht wurde, war lediglich im porös wirkenden AKR – Gel ein CaO – Gehalt < 30 % nachweisbar. Das Gel im Prisma mit Rhyolith war nur in seiner glasig dichten Erscheinungsform zu finden, das CaO – Gehalte deutlich über 30 %

aufwies. Eindeutige Hinweise, warum Luftporen einiger Prismen mit AKR – Gel „zuwachsen“ und einige mit AKR – Gel ähnlich einer Flüssigkeit „vollaufen“, konnten nicht gefunden werden. Auffällig war noch, dass die Gele der Versuchskörper mit den größeren Dehnungen im Vergleich zu den anderen seltener und nur in geringen Mengen „Verunreinigungen“ durch Aluminiumoxid und Schwefeltrioxid aufwiesen.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass die in diesen Probekörpern gefundenen Gele ähnliche Zusammensetzungen und visuelle Struktureigenschaften aufweisen, wie Gele die im Rahmen von Gutachten am F. A. Finger-Institut an AKR geschädigten Betonen untersucht wurden. Der aus den Gutachten entstandene Probenkatalog umfasst deutlich über hundert Gelproben. Eine Auswahl dieser Zusammensetzungen ist in Abbildung 5.2.1 wieder gegeben.

## 4.2 Betonproben im Vergleich Nebelkammer / Klimakammer / Außenlagerung

Für die Untersuchungen wurden Betonbalken der Größe 8 cm x 8 cm x 25 cm in Anlehnung an die DIN EN 12390-1 mit folgenden Gesteinskörnungen hergestellt. Die Basis für alle Proben bildet ein gebrochener Oberrheinkies, wobei dieser außer bei den Referenzproben (mit Stressquarz bezeichnet) durch 20 % einer anderen Gesteinskörnung (Diabas, Flint, Kieselschiefer und Kieselkalk) ersetzt werden sollte.

### **Probenzusammensetzung**

Es wurden je drei Betonbalken pro Lagerung mit sechs unterschiedlichen Gesteinskörnungen hergestellt. Sie sollten mit drei unterschiedlichen Lagerungsarten (Klimakammer-, Nebelkammer- und Außenlagerung) beaufschlagt werden. Für die Herstellung der Betonbalken wurde ein Zement der Sorte CEM I 32,5 R verwendet. Es handelte sich dabei nach der Alkali- Richtlinie um einen speziellen Prüfzement mit einem  $\text{Na}_2\text{O}$ - Äquivalent von  $1,3 \pm 0,1 \text{ M\%}$ . Als Körnung wurden Natursand 0/2 und gebrochener Oberrheinkies 2/8 und 8/16 verwendet. Dieser wurde außer in den Referenzproben durch 20 M% einer anderen Gesteinskörnung ersetzt.

Beispielhaft ist hier die Betonrezeptur für die Betonbalken mit Kieselkalk angegeben:

- 6,00 kg CEM I 32,5 R
  - 2,70 kg Wasser
  - 8,23 kg Natursand 0/2
  - 8,78 kg gebrochener Oberrheinkies 2/8
  - 6,58 kg gebrochener Oberrheinkies 8/16
  - 2,20 kg potentiell reaktiver Kieselkalk 2/8
  - 1,65 kg potentiell reaktiver Kieselkalk 8/16
- } 20 %  
Austauschgesteins-  
körnung

### **Lagerung**

Um die Reaktion im Beton, insbesondere der eingesetzten Gesteinskörnungen auszulösen, wurden je gleiche Teile der ausgehärteten Prüfkörper drei Lagerungsarten unterworfen. Dabei wurden 18 Betonbalken 249 Tage in der Klimakammer, 18 Betonbalken 249 Tage in der Nebelkammer und 18 Betonbalken 249 Tage über den Jahreswechsel 2002 / 2003 außen gelagert. Dabei zeichneten sich die Monate Februar und März 2003 durch relativ viel Sonne und wenig Niederschlag aus, die Monate April und Mai hatten deutlich höhere Niederschlagsmengen und schon recht hohe Temperaturen. Der Sommer und der Herbst 2003 fielen sehr warm und trocken aus.[40]

Ein eventuell vorhandener Einfluss der drei verschiedenen Lagerungen kann auf diese Weise mit in die Beschreibung der Reaktionsprodukte einfließen.

### **Längenänderung**

Es zeigte sich erwartungsgemäß bei allen verwendeten reaktiven Gesteinskörnungen eine Dehnung der Probekörper in der Klima- und auch der Nebelkammer. Aber auch bei der Referenzprobe mit 100 % Stressquarz und der mit nicht reaktivem Diabas versetzten Probe konnte in der Klimakammer eine Dehnung verzeichnet werden. Trotz der hier abweichenden Probekörperabmessungen sollen zu Vergleichszwecken die Grenzwerte für Betonbalken mit

10 cm x 10 cm x 50 cm herangezogen werden. In der Klimakammer konnte ein exponentieller Anstieg der Dehnungen beobachtet werden, bei dem alle Gesteinskörnungen deutlich den Grenzwert von 0,4 mm/m überschritten. In der Nebelkammer kam es zu einem relativ gleichmäßigen Anstieg der Dehnungen, der bei allen Gesteinskörnungen mit zunehmender Lagerungsdauer einem Grenzwert entgegen strebte. Hierbei wurde nicht von allen Gesteinskörnungen der Grenzwert von 0,6 mm/m Dehnung überschritten. Die Außenlagerung zeigte bis zum Versuchsende keine Dehnungen an den Probekörpern. In Abbildung 4.2.1 sind die Dehnungsverläufe bei der Nebelkammerlagerung und in Abbildung 4.2.2 bei der Klimakammerlagerung dargestellt

### Längenänderung Nebelkammer

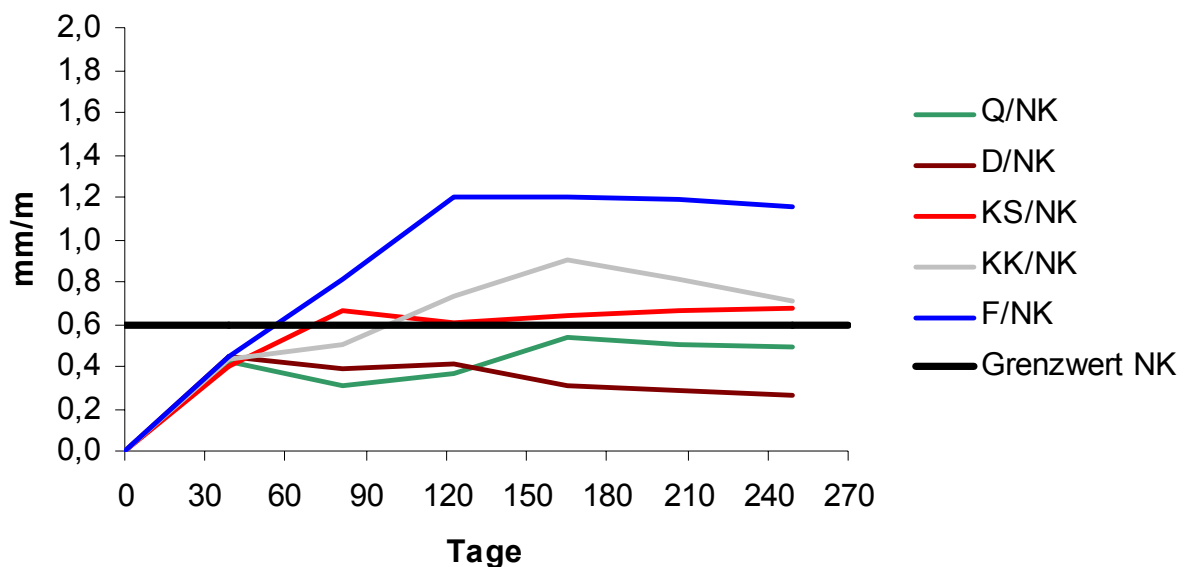


Abbildung 4.2.1: Längenänderung der Betonbalken bei Nebelkammerlagerung

### Längenänderung Klimakammer

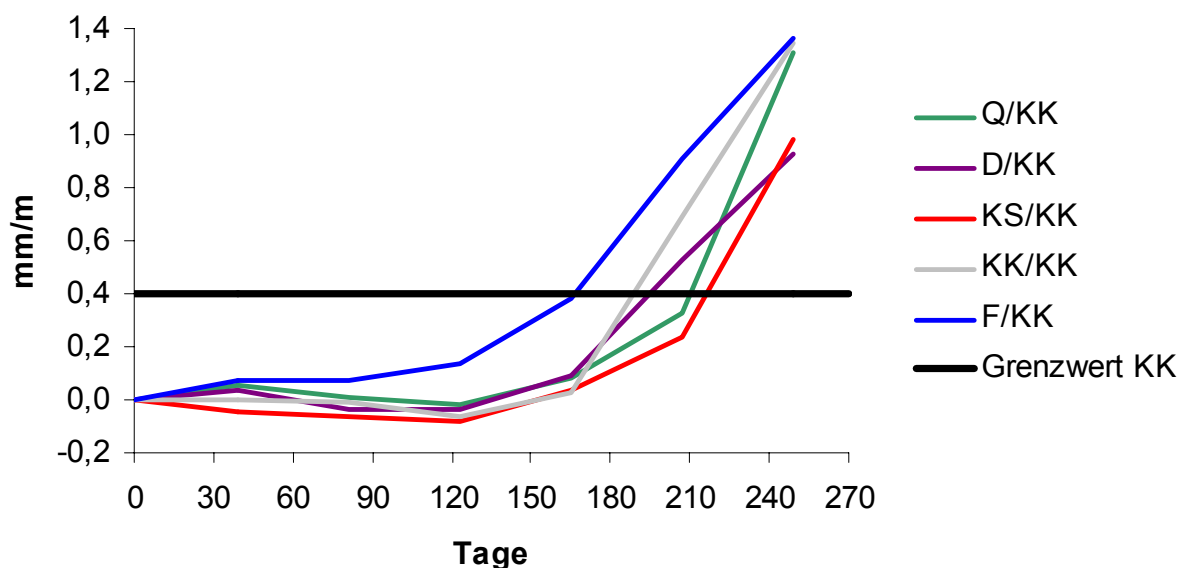


Abbildung 4.2.2: Längenänderung der Betonbalken bei Klimakammerlagerung

### **makroskopische Untersuchungen**

Es zeigt sich, dass die Betonbalken der Klimakammerlagerung deutliche Risse an allen Seiten aufweisen. Hingegen sind die Probekörper der Nebelkammerlagerung von weit weniger Rissen durchzogen. Keine Risse fanden sich auf den Prüfkörpern, welche die gesamte Zeit außen gelagert wurden. Beispielhaft für die vorgefundenen Rissbilder bei der Klimakammerlagerung ist in Abbildung 4.2.3 ein Prüfkörper mit Kiesel-schiefer und Oberrheinkies als Gesteins-körnung dargestellt.



Abbildung 4.2.3: Betonbalken nach Klimakammerlagerung

### **Lichtmikroskopie**

Da in allen Proben reaktives Oberrheinmaterial eingesetzt wurde, zeigten auch Probekörper eine Alkali-Kieselsäure-Reaktion, die kein zusätzliches alkalireaktives Gestein, wie z.B. die

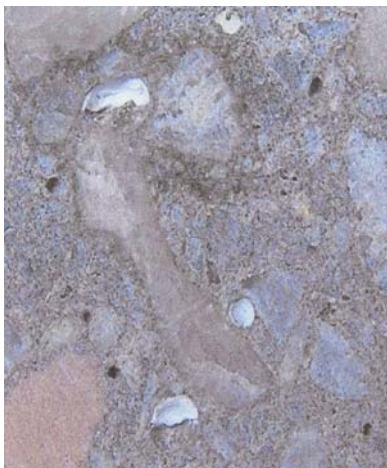


Abbildung 4.2.4: Betonbalken mit Kiesel-schiefer, nivelliertes Gel in Pore, untere Bildkante 2 cm



Abbildung 4.2.5: Betonbalken mit Kieselkalk, nivelliertes Gel in Pore, untere Bildkante 2 cm



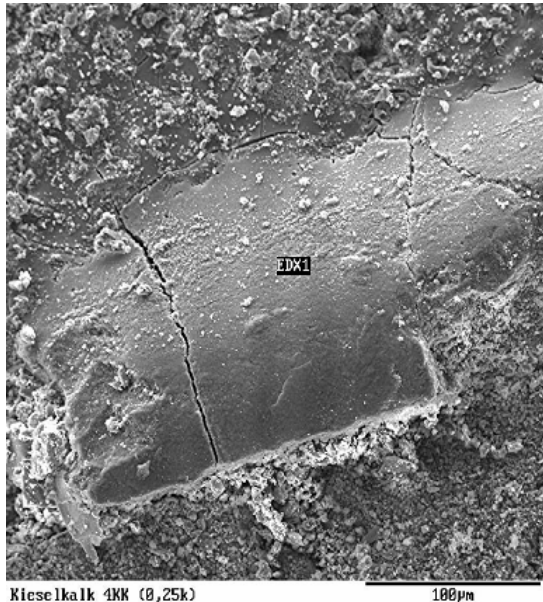
Abbildung 4.2.6: Betonbalken mit Stressquarz, nivelliertes Gel in Pore, untere Bildkante 2 cm

Diabasproben, enthielten. Hier sollen ausgewählte Schadensbereiche und Reaktionsprodukte vorgestellt und auf ihre Eigenschaften untersucht werden. Es konnten in den Betonbalken, unabhängig von der eingesetzten Gesteinskörnung, die selben nivellierten Gele in Poren gefunden werden wie sie in Abschnitt 4.1 bei den Mörtelprismen beschrieben wurden. In den Abbildungen 4.2.4 bis 4.2.6 sind solche nivellierten Gele in Poren der Betonbalken zu sehen. Ihre Struktur der gefundenen Gele ist ebenfalls mit der der in den Mörtelproben vorhandenen Alkaligele vergleichbar. Somit ist im Gegensatz zu den Dehnungsmessungen kein Einfluss einer Probekörpergröße und Korngröße auf die Struktur und Zusammensetzung der Reaktionsprodukte feststellbar.



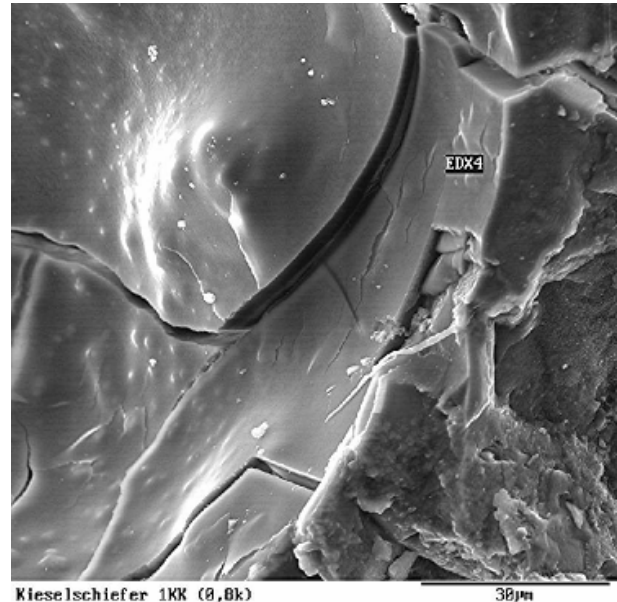
### REM und EDX-Analyse

Wie bei den Mörtelprismen soll auch die Struktur und Zusammensetzung der Reaktionsprodukte in den Betonbalken untersucht und beschrieben werden. In den Abbildungen 4.2.7 bis 4.2.10 sind ausgewählte Gelstrukturen und Analysepunkte dargestellt. Abbildung 4.2.7 zeigt ein Gel, welches an der Oberfläche eines Kieselkalk-Balkens gefunden



Kieselkalk 4KK (0,25k)

Abbildung 4.2.7: Gel auf Betonbalken mit Kieselkalk



Kieselschiefer 1KK (0,8k)

Abbildung 4.2.8: Gel in Betonbalken mit Kieselschiefer

wurde. Es weist eine dichte, glasige Struktur auf und enthält, wie in Tabelle 4.2.1 angegeben, nur geringe Alkalimengen und sehr viel Kieselsäure. Im Inneren des Balkens konnten neben den glasig, dichten Gelen auch poröse Reaktionsprodukte gefunden werden. In den Balken mit Kieselschieferanteilen in der Gesteinskörnung konnte unter anderen ebenfalls ein sehr dichtes Gel gefunden werden, Abbildung 4.2.8. Auch dessen Zusammensetzung ist von geringen Alkalianteilen und einem hohem Kieselsäureanteil gekennzeichnet. Im Gegensatz zu den dichten, glasigen Strukturen sind in den Abbildungen 4.2.9 und 4.2.10 schollenartige bzw. plattenartige Reaktionsprodukte zu erkennen. Diese Strukturen wurden neben anderen in Betonbalken mit Stressquarzanteilen in der Gesteinskörnung vorgefunden. Die schollenartige Struktur weist einen höheren Alkalianteil auf und das Gefüge scheint nicht so dicht wie bei den Gelen in Abbildung 4.2.7 und 4.2.8.

Tabelle 4.2.1: EDX-Analysen Betonbalken

Oxide	EDX 1	EDX 4	EDX 10	EDX 11
Na <sub>2</sub> O	0,88	0,93	2,99	---
K <sub>2</sub> O	3,85	7,09	12,65	7,42
CaO	20,39	25,66	16,56	6,08
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	---	5,77	---	---
SiO <sub>2</sub>	73,36	60,54	67,80	86,50
Total	98,48	99,99	100,00	100,00



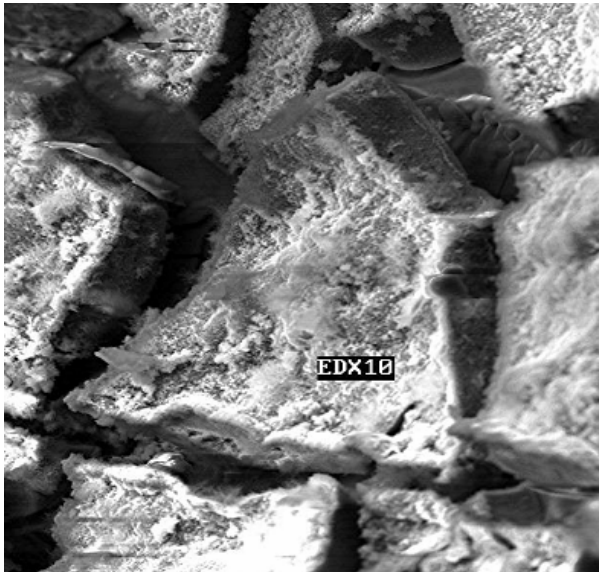


Abbildung 4.2.9: Gel in Betonbalken mit Stressquarz

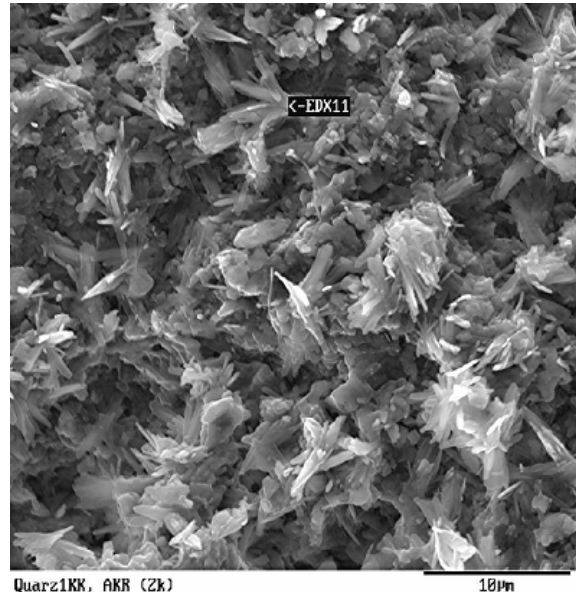


Abbildung 4.2.10: Gel in Betonbalken mit Stressquarz

In ihrer Zusammensetzung unterscheiden sich die porösen Strukturen von den dichten in einem geringeren Calciumanteil und leicht erhöhten Alkaligehalten.

### 4.3 Auswertung/Zusammenfassung

Die in den Dehnungsmessungen festgestellten Ergebnisse konnten sowohl bei den hier vorgestellten Mörtelprismen als auch bei den Betonbalken durch makroskopische, mikroskopische und analytische Untersuchungen eindeutig einer stattgefundenen Alkali-Kieselsäure-Reaktion zugeordnet werden. Die unter dem Auflichtmikroskop sichtbaren Reaktionsprodukte lassen sich mit Aufnahmen im Rasterelektronenmikroskop und durchgeführter EDX – Analyse eindeutig als AKR – Gele nachweisen. Die Häufigkeit, mit der die AKR – Produkte in den jeweiligen Probekörpern erkennbar waren, geht mit den Ergebnissen der Dehnungsmessung konform. Deutlich wurde, dass die Gele je nach Gesteinskörnung unterschiedliche Zusammensetzungen aufwiesen. Danach kamen die Probekörper, bei denen AKR – Gele mit CaO – Gehalten  $< 30 \%$  festgestellt wurden, auf die größten Dehnungswerte. Außerdem war die Ausbildung zweier Gelstrukturen auffällig. Während bei den Proben mit geringen Dehnungswerten fast ausschließlich glasig dichte Gele mit hohen Ca-Gehalten erkennbar waren, zeigten die Prismen bzw. Balken mit großen Dehnungen vorzugsweise porös aussehende Reaktionsprodukte mit geringen Calciumanteilen. In diesem Zusammenhang konnte jedoch noch nicht eindeutig geklärt werden, warum sich das porös wirkende Gel bei allen Proben am Boden der Luftporen ausnivelliert. Es ist aber davon auszugehen, dass diese Gele vor der Probenpräparation für die REM-Aufnahmen eine niedrige Viskosität und einen hohen Wassergehalt aufwiesen, hingegen die Gele mit dichten glasigen Strukturen hochviskos waren und nur geringe Wassergehalte hatten.

Die Rückschlüsse auf die Quelfähigkeit decken sich mit denen in der internationalen Literatur angegebenen Grenzen für eine Quelfähigkeit von Alkali-Silikat-Gelen hinsichtlich ihres Calciumgehaltes. In dem folgenden Dreistoffdiagramm sind die in diesem Abschnitt ermittelten Gelzusammensetzungen eingetragen. Dabei wurden Proben, die denselben Datenpunkt

ergeben, nur einmal eingetragen. Es bilden sich deutlich zwei Punktwolken, die sich hauptsächlich im Calciumgehalt der Proben unterscheiden. Die Proben mit niedrigen Calciumgehalten erscheinen unter dem REM überwiegend porös, hingegen die Gele mit höheren Calciumgehalten als glasig-dichte Strukturen. Eine Abhängigkeit von der Probengeometrie kann nicht festgestellt werden.

Für die Zusammensetzung der im weiteren Verlauf der Arbeit zu untersuchenden synthetischen Gele wird aus diesen Erkenntnissen ein variierender Calciumgehalt von 0 % bis 40 % angestrebt. Der Alkaligehalt der Proben sollte einen weiten Bereich abdecken, da durch die Alterungsvorgänge, d. h. eine stetige Änderung der Zusammensetzung der Gele je nach umgebenden Reaktionspartner, keine zielführenden Einschränkungen gemacht werden können.

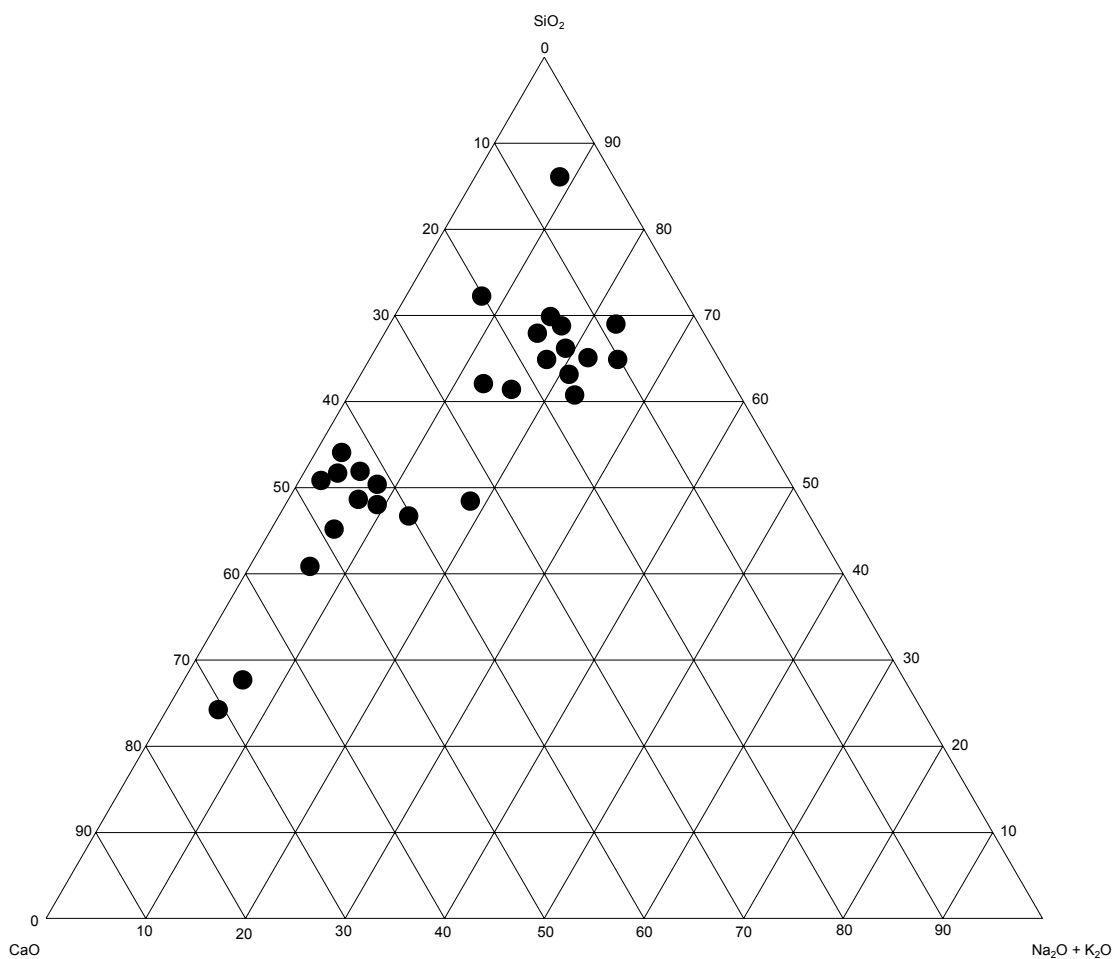


Abb. 4.3.1: Dreistoffdiagramm mit EDX-Analysen der in diesem Abschnitt untersuchten Gelproben

## 5 Quellversuche

### 5.1 Entwurf und Entwicklung der Quellformen

In diesem Abschnitt soll zunächst kurz die Entwicklungsarbeit an den Quellformen erläutert werden, auf die endgültig verwendete Quellform wird dabei genauer eingegangen. Zu Beginn dieser Arbeit waren wie im Abschnitt 3.3 dargelegt, weltweit nur wenige Quellformen zur Messung von Quelldrücken von Alkali-Kieselsäure Gelen bekannt. Somit musste zunächst eine einfache, aber hinreichend genaue Messtechnik entwickelt werden. Für den Entwurf der Quellformen wurde als erstes ein Anforderungsprofil erarbeitet. Sie sollten einerseits Messungen der entstehenden Drücke bei dreiaxialer Quellbehinderung gewährleisten, andererseits ist eine Längenänderungsmessung mit einaxialer Quellbehinderung für geringe Quellpotenziale am sensibelsten und sollte somit auch möglich sein. Es ist eine Feuchtigkeitzufuhr zu ermöglichen und es sollte ein Probenwechsel und die Reinigung mit möglichst praktikablem Aufwand erfolgen können. Da bereits Erfahrungen aus der Quellzementforschung im FIB vorlagen, wurden zunächst Formen, die zur Bestimmung des Quell- und Schwindverhaltens von Mörteln eingesetzt werden, modifiziert. Diese Formen, auch als Schwindrinnen bezeichnet, besitzen Probekörperabmessung von 40 mm x 40 mm x 160 mm. Da diese Probemenge für eine Quellmessung an einem synthetischen Gel viel zu groß war, kam ein Abstandhalter, der die Prüfkörperlänge von 160 mm auf 40 mm verkürzt, zum Einsatz. Es konnte somit die benötigte Menge an Ausgangsmaterial verringert werden. Die Abmessungen der Probekörper betragen 40 mm x 40 mm x 40 mm. Abbildung 5.1.1 zeigt die modifizierte Form. Der eingesetzte Kunststoffkolben ist durch Fett zu den Wänden hin abgedichtet und leicht beweglich. Seine Verschiebung wird mit Hilfe eines induktiven Wegaufnehmers mit einem Messbereich von 0 - 10 mm aufgezeichnet. Die Wasserzuführung erfolgt über eine aus der Medizintechnik entlehene Tropfeinrichtung. Somit ist eine ständige Durchfeuchtung der Proben, auch über längere Prüfzeiten und nachts oder über Wochenenden gewährleistet. Überschüssiges Wasser kann an den Formen hinunter in Fotoschalen laufen, wo es aufgefangen wird.

In Abbildung 5.1.3 sieht man die Tropfeinrichtung. Da diese Formen nur für die Bestimmung von Quellmaßen geeignet sind, sollte in einem nächsten Entwicklungsschritt eine Form für die Querkraftbestimmung entwickelt werden. Dabei lag es nahe, einerseits Messungen der entstehenden Drücke bei dreiaxialer Quellbehinderung und andererseits die Bestimmung der Längenänderung bei zweiaxialer Quellbehinderung zu kombinieren. Die unter diesen Maßgaben entwickelte Quellform (Abb. 5.1.2 und 5.1.5) hat einen Durchmesser von 5 cm und eine komprimierte Füllhöhe von 3,5 cm, wodurch sich ein Probenvolumen von etwa 68,7 cm<sup>3</sup> ergibt. Sie gewährleistet die stetige Wasserzufuhr über zwei seitlich angebrachte Buchsen,

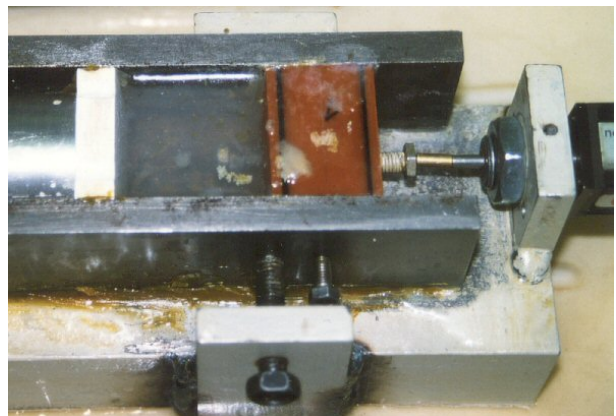


Abbildung 5.1.1: umgebaute Schwindrinne

Die unter diesen Maßgaben entwickelte Quellform (Abb. 5.1.2 und 5.1.5) hat einen Durchmesser von 5 cm und eine komprimierte Füllhöhe von 3,5 cm, wodurch sich ein Probenvolumen von etwa 68,7 cm<sup>3</sup> ergibt. Sie gewährleistet die stetige Wasserzufuhr über zwei seitlich angebrachte Buchsen,

durch welche die in Abbildung 5.1.3 dargestellte Tropfeinrichtung die Probe mit Flüssigkeit beaufschlagt.



Abbildung 5.1.2: Quellform mit seitlichen Buchsen zur kontinuierlichen Wasserzufuhr

Die Flüssigkeitsmenge wird an einem Schieberegler eingestellt und kann am Tropf kontrolliert werden. Da jeder Tropfen ein relativ konstantes Volumen hat, kann man über die Anzahl der Tropfen je Zeiteinheit einen Anhaltswert über die zugeführte Wassermenge erhalten.

Die entstehenden Dehnungskräfte werden durch eine Kraftmessdose aufgenommen, welche gemeinsam mit der Quellform in einer Vorrichtung eingespannt ist und die Dehnungsbehinderung in Richtung z-Achse gewährleistet. Durch Austausch der Kraftmessdose mit einem induktiven Wegaufnehmer kann in der gleichen Quellform ein Quellmaß ermittelt werden. In dieser Form konnte das Quellverhalten als Quellmaß während einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion sehr gut abgebildet werden. Die Darstellung der Quellkraftentwicklung erfolgte jedoch nicht zufrieden stellend. Hier zeigten sich noch einige Probleme am Versuchsaufbau ab.

Als wichtigste Nachteile der bisherigen Apparatur stellen sich die folgenden Punkte dar:

- drückend anstehendes Wasser an der Probe und daraus folgende starke Lösungserscheinungen
- schlechte Dosierbarkeit bei sehr geringen Durchflussmengen
- kleinste „Flüssigkeitsportionsgröße“ 1 Wassertropfen ist zu groß für die kleine Probenmenge
- zu geringe Übergangsfläche zwischen Probe und Flüssigkeit an den Flüssigkeitszufuhrbuchsen im Verhältnis zum Probenvolumen
- große Gefahr des Abflusses von Gel und Lösung durch die Flüssigkeitszufuhrbuchsen
- keine Möglichkeit osmotische Verhältnisse in der Probe zu erzeugen



Abbildung 5.1.3: Apparatur zur kontinuierlichen Wasserversorgung der bisherigen Quellform



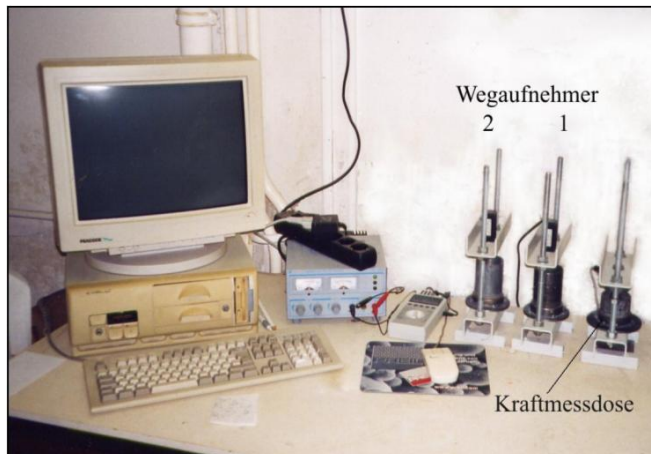


Abbildung 5.1.4: kompletter Versuchsaufbau



Abbildung 5.1.5: Messaufbau für Querkraftbestimmung im Rahmen

Diese Gründe führten in weiteren Überlegungen zur Umgestaltung der vorhandenen Apparatur bzw. letztendlich zur Neuentwicklung einer weiteren Quellform.

In dieser Form sollte es auch möglich sein, eine semipermeable Membran einzubringen. Mit dieser können osmotische Verhältnisse in der Probe erzeugt werden und somit auch osmotische Drücke gemessen werden.

Als eine weitere wichtige Anforderung war eine stetige und möglichst großflächige Flüssigkeitszufuhr zur Probe festgelegt worden. Diese wird durch einen in der Flüssigkeit stehenden saugenden Stein erreicht. Durch kapillaren Transport kann das flüssige Medium auch über einen längeren Zeitraum und eine relativ große Kontaktfläche gleichmäßig an die Probe weitergeleitet werden. Zusätzlich gewährleistet der Stein die Dehnungsbehinderung der Probe in dieser Richtung. Gleichzeitig soll aber auch sichergestellt werden, dass bei Verwendung einer alkalischen Flüssigkeit der Stein keinerlei unerwünschte Nebenreaktionen mit der Lösung eingeht und somit das Ergebnis verfälschen würde. Deshalb müssen Kieselsäure enthaltende Gesteinsarten ausgeschlossen werden. Da eine gute kapillare Saugfähigkeit des Steines sichergestellt werden soll, werden relativ poröse Gesteinsarten gewählt. Eine erste Wahl fiel daher auf einen Schaumkalk, einen Travertin, einen Porphyrtuff und einen Porenbeton, später folgte ein Zementstein, der dann auch nach den Vorversuchen für die Messungen verwendet wurde. In Abbildung 5.1.6 ist die Porenradienverteilung des verwendeten Zementsteines wiedergegeben. Ein Großteil der Poren befinden sich im Bereich zwischen 0,01 und 0,1  $\mu\text{m}$ . Im Vergleich haben Zellulosemembranen, wie sie z. B. in [58] verwendet wurden, einen Porendurchmesser von 0,05  $\mu\text{m}$  (50 nm).

Zur Herstellung dieses Zementsteines wurde ein alkaliarmer Portlandzement bei einem w/z-Wert von 0,5 verwendet. Nach der Herstellung erfolgte eine mehrtägige Auslaugung der Steine in einem temperierten Wasserbad.

Die kapillare Wassertransportmenge ist abhängig:

- vom Porengefüge des Steins (Anzahl und Porenradienverteilung der Kapillarporen),
- dem Grenzwinkel zwischen der Flüssigkeit und der Oberfläche der Kapillarporen und
- vom Höhenunterschied zwischen Wasserstandsspiegel und Grenzfläche Stein/Probe.

Kapillarporendurchmesser liegen im Bereich von 10 nm bis 100  $\mu\text{m}$ . Große Kapillarporendurchmesser bewirken eine hohe Transportmenge der Flüssigkeit bei gleichzeitig geringer maximaler Steighöhe, wohingegen kleinere Durchmesser eine geringere

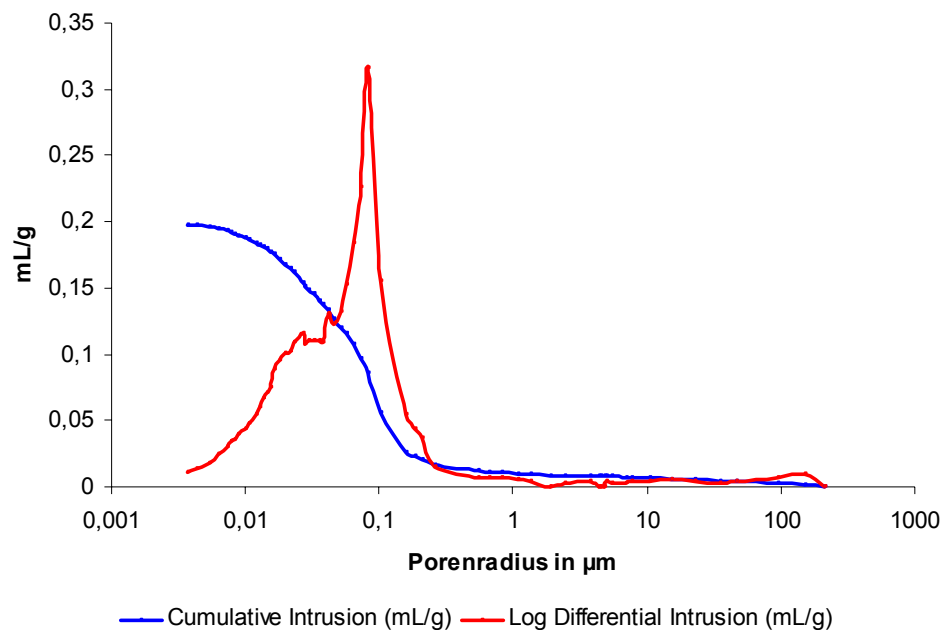


Abbildung 5.1.6: Porenradienverteilung des verwendeten Zementsteins

Transportleistung bei gleichzeitiger Erhöhung der maximalen Steighöhe zur Folge haben werden. Da die zu überwindende Steighöhe in diesem Fall nur sehr gering ist (kleiner 1 cm), wird ein maximaler Wassertransport durch eine Kapillarporenverteilung im hohen Durchmesserbereich erfolgen.

Der Grenzwinkel zwischen der Flüssigkeit und der inneren Kapillarporenoberfläche ist von der Oberflächenspannung und der chemischen Ähnlichkeit zwischen der Flüssigkeit und dem Stein abhängig (polar, unpolar). Kapillares Saugen ist erst ab Grenzwinkeln kleiner  $90^\circ$  möglich. Je kleiner der Grenzwinkel, desto stärker ist der kapillare Transport. Eventuelle Verschmutzungen mit unpolaren Stoffen (Öle, Hydrophobierungsmittel etc.) können den Grenzwinkel erheblich erhöhen und dadurch den kapillaren Transport stark reduzieren bzw. zum Erliegen bringen.

Der Einfluss des Höhenunterschiedes auf den Flüssigkeitstransport kann minimiert werden, indem die waagerechte Querschnittsfläche der Wasseroberfläche möglichst groß dimensioniert wird. Dadurch kann von der Probe relativ viel Flüssigkeit aufgenommen werden, ohne dass der Wasserstand stark sinken und dadurch die erforderliche Steighöhe relevant erhöhen würden.

Mit den hier dargelegten Anforderung wurde ein dreidimensionales Modell entwickelt (siehe Abbildung 5.1.7), an welchem schnell und problemlos Änderungen während der Entwurfsphase gemacht werden konnten. Anhand dieses Modells wurde die in Abbildung 5.1.8 dargestellte Versuchsvorrichtung gefertigt. Es erfolgten anschließend mehrere Probeversuche mit verschiedenen Gesteinsarten als kapillare Flüssigkeitstransportträger.



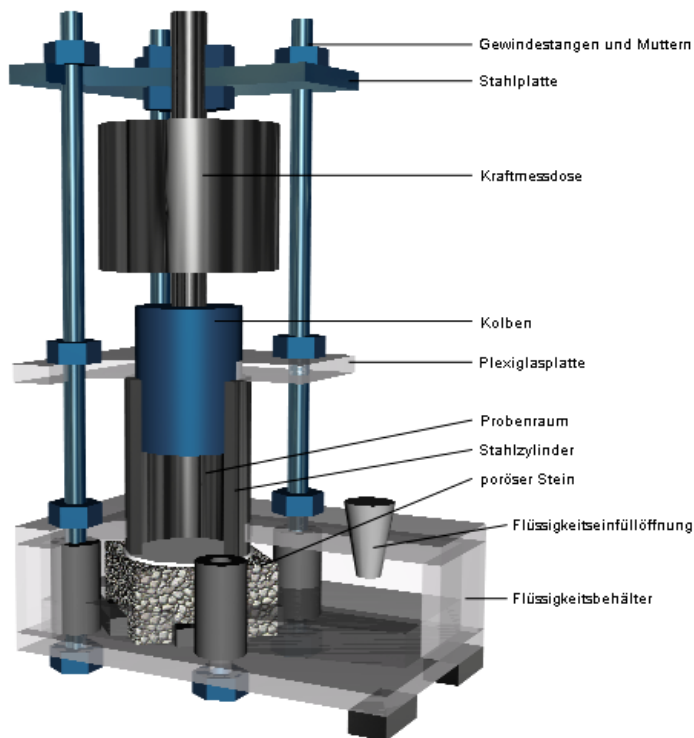


Abbildung 5.1.7: dreidimensionales Modell der Quellform



Abbildung 5.1.8: Quellform mit Wasserbehälter

Die einzelnen Komponenten der Quellform und ihre Anforderungen und Aufgaben sind nachstehend angegeben:

#### Flüssigkeitsbehälter

- Bereitstellung der Flüssigkeit für die gewünschte Reaktion in der Probe
- Vermeidung von Verdunstung und Verunreinigung der Flüssigkeit
- Sichtbarkeit der Flüssigkeit (Prüfung von Verfärbungen, Flüssigkeitsstand etc.)
- Geringe Differenz zwischen Maximum und Minimum des Flüssigkeitsstandes
- Gewährleistung eines unkomplizierten Auffüllen der Flüssigkeit
- Aufnahme, Übertragung der Kräfte infolge Quellen und Zylindervorspannung vom Stein über den Flüssigkeitsbehälterboden auf die Schrauben
- Dichtigkeit
- Gewährleistung der Standsicherheit der Quellvorrichtung

Stein,  $l = 40 \text{ mm}$ ,  $b = 32 \text{ mm}$ ,  $h = 10 \text{ mm}$

- Gleichmäßiger Flüssigkeitstransport vom Flüssigkeitsbehälter zur Probe
- Übertragung der Druckspannungen von der Probe zum Flüssigkeitsbehälterboden
- Übertragung der Vorspannungen des Zylinders zum Flüssigkeitsbehälterboden
- Muss inert sein (darf sich nicht an den Reaktionen beteiligen)

Zylinder,  $h = 50 \text{ mm}$ ,  $\text{innen}\varnothing = 30 \text{ mm}$

- Dehnungsbehinderung der Probe in x- und y-Richtung
- Übertragung der Vorspannung in z-Richtung zwischen Stein und Platte 1, welche das Abheben des Zylinders vom Stein vermeiden soll

Kolben,  $h = 40 \text{ mm}$ , außen $\varnothing = 29,8 \text{ mm}$

- Möglichst reibungsarmes Übertragen der Dehnungen in z-Richtung zum Wegaufnehmer bzw. der Quellkräfte zur Kraftmessdosenunterseite
- Dichtheit zwischen Kolben und Zylinder zur Vermeidung eines seitlichen Herausquellens des AKR-Gels

Platte 1

- Übertragung der Kräfte infolge Vorspannung der Schrauben auf den Zylinder
- Lagesicherung des Zylinders
- Gewährleistung eines reibungsfreien Kolbendurchgangs

Platte 2

- Übertragung der Quellkräfte von den Schrauben zur Kraftmessdosenoberseite
- Lagesicherung der Kraftmessdose

Kraftmessdose / Wegaufnehmer

- Aufnahme der Quellkräfte/Quellmaße der Probe und Weiterleitung an einen Rechner
- Möglichst geringe Verformung der Kraftmessdose bei den entstehenden Quellkräften

Um fehlerfreie Messergebnisse zu erhalten, muss eine Quellform oder ein Kraftrahmen eine ausreichende Steifigkeit besitzen. Die zu Beginn verwendeten Messeinrichtungen sind durch ihre Anlehnung an die Quellzementforschung sehr massiv ausgelegt und wurden nicht weiter auf ihre Verformungseigenschaften überprüft. Die letztendlich neu entwickelte Quellform ist aus verschiedenen o. g. Gründen wesentlich filigraner und aus leichteren Materialien aufge-

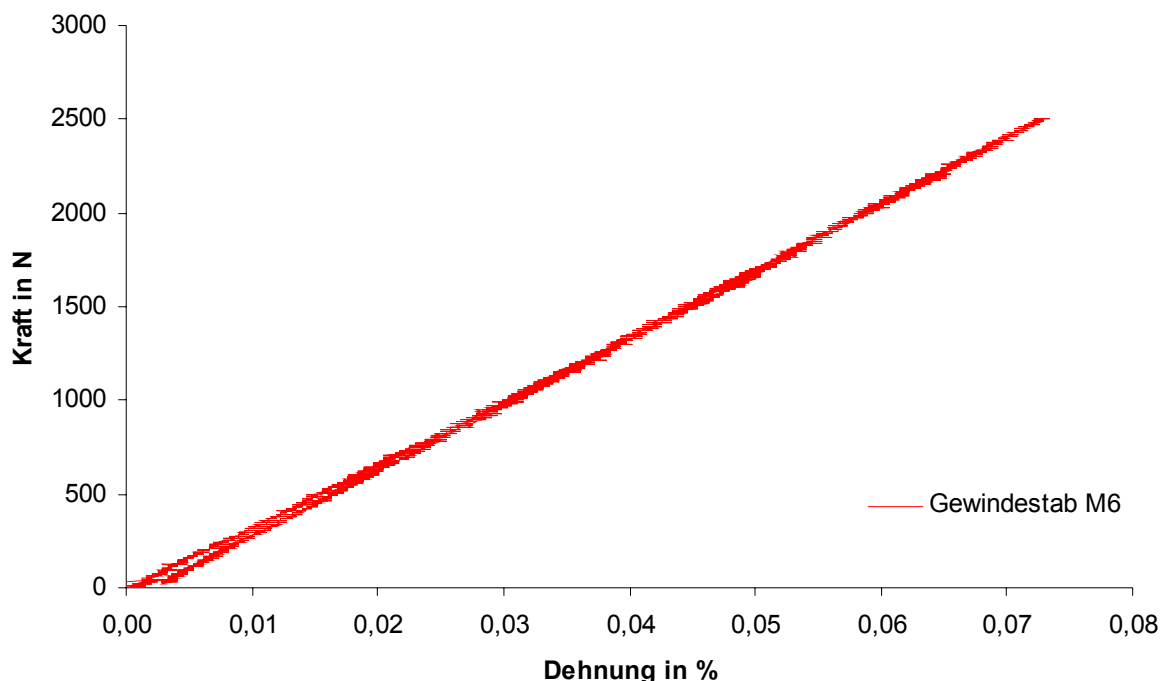


Abbildung 5.1.8: Kraft-Dehnungslinie eines Zugstabes der Quellform

baut. Da es sich auch bei dieser Quellform um einen geschlossenen Kraftrahmen handelt, sind lediglich plastische Verformungen in der Quellform als problematisch anzusehen. Um zu überprüfen, ob bei den zu erwartenden Lasten eine plastische Verformung auftritt, wurde ein Zugstab aus der Quellform entnommen und dessen Kraft-Dehnungslinie aufgenommen. In Abbildung 5.1.8 ist das Verformungsverhalten des Zugstabes bis zu einer maximalen Kraft von 2500 N dargestellt. Diese Kraft entspricht, übertragen auf die Quellform, der maximalen Belastung der Kraftmessdose von 10000 N. Es ist deutlich zu erkennen, dass sich der Gewindestab, bei den in der Quellform auftretenden Kräften, im elastischen Verformungsbereich befindet. Somit können Messfehler durch plastische Verformung der Lastzelle in der Quellform ausgeschlossen werden. Aus dieser Messung kann für den Gewindestab ein E-Modul von  $176000 \text{ N/mm}^2$  errechnet werden.

## 5.2 Probenherstellung und Vorbereitung

### Probenherstellung und Probenzusammensetzung

In Anlehnung an die in Abschnitt 4 vorgestellten Analysen und aus weiteren Untersuchungen an AK-Gelen aus Schadensfällen erfolgt die Auswahl der Zusammensetzung der zu untersuchenden Proben. Aus den Erkenntnissen wird ein variierender Calciumgehalt von 0 % bis 40 % angestrebt. Der Alkaligehalt der Proben sollte einen weiten Bereich abdecken, da durch die starke Streuung der Gehalte in den untersuchten Gelen keine zielführenden Einschränkungen gemacht werden können. Da die Reaktionsprodukte in AKR-geschädigten Betonen Wassergläsern stark ähneln, sollen die Proben analog zu einer Wasserglasherstellung erzeugt werden. Wassergläser können wie in Abschnitt 3, Eigenschaften von Alkalisilikatgläsern und deren Lösungen, in drei Verfahren hergestellt werden. Für die Probenherstellung kommen das Schmelz- und eine abgewandelte Form des Hydrothermalverfahrens in betracht. Das Schmelzverfahren zeichnet sich durch einen direkten Einfluss auf die Zusammensetzung der Wassergläser aus, beim Hydrothermalverfahren entstehen die Wassergläser je nach Konzentration der Ausgangsstoffe in der Lösung. Um die Vor- und Nachteile der Herstellungsverfahren zu überprüfen, wurden zunächst in Vorversuchen Quellmessungen an künstlich erzeugten Alkalisilikat-Gelen verschiedener Zusammensetzung, an handelsüblichen Wassergläsern und an Gesteinsmehlen unter Zugabe von Wasser, Alkalihydroxid- oder Calciumhydroxidlösungen (ähnlich dem Hydrothermalverfahren) durchgeführt. Für die künstlich erzeugten Alkalisilikat-Gele (weiter als Schmelzversuch bezeichnet, G1 bis G33) basieren die stofflichen Zusammensetzungen der Proben auf den ermittelten oxidischen Zusammensetzungen von im Beton vorgefundenen Alkalikieselsäure-Gelen (siehe Abschn. 4). Schon in den Vorversuchen zeigte sich, dass niedrige Alkaligehalte, wie oft in Gelen aus Betonschäden gefunden, nicht zu nennenswerten Quelleigenschaften führen. Aus diesem Grund wurden zwei Bereiche für den Alkaligehalt (in Abb. 5.2.1 erkennbar) der Proben gewählt. Um die Zusammensetzung und die Struktur der natürlichen Gele, d. h. der im Beton gefundenen Gele, nachzustellen ist es nötig die entsprechenden Ausgangsstoffe zu dosieren und analog wie bei der Wasserglasherstellung zu einem Glas zu schmelzen. Da dieser Herstellungsprozess sehr aufwendig und kostenintensiv ist, sollten auch alternative Ausgangsstoffe für die Quellmessungen überprüft werden. Die handelsüblichen Wassergläser (weiter als Wasserglasversuch bezeichnet, W1 bis W6) wurden in fester Form als Granulat oder Stückglas bezogen und für die Messungen wie im Abschnitt 5.2.2 aufbereitet. Ihre chemische Zusammensetzung wurde gegenüber den gelieferten Wassergläsern nicht verändert. Somit ergeben sich für diese Versuche keine Variationsmöglichkeiten in der chemischen Zusammensetzung der Quellproben. Für die Versuche mit Gesteinsmehlen und Alkalilösungen (weiter als Lösungsversuch bezeichnet, C1 bis C9) wurden die Gesteine ebenfalls wie im Abschnitt 5.2.2 beschrieben aufbereitet und in Anlehnung an das Hydrothermalverfahren der Alkalilösung ausgesetzt. Als Alkalilösungen kamen Natronlauge, Kalilauge und eine Kombination beider Laugen zum Einsatz. In den Tabellen 5.2.1 bis 5.2.3 wird eine Übersicht über alle in dieser Arbeit untersuchten Probenzusammensetzungen gegeben. In Abbildung 5.2.1 sind die Proben G1 bis G20 (rot) in ein  $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} - \text{CaO} -$

SiO<sub>2</sub> Dreistoffdiagramm zum Vergleich mit Gelproben aus verschiedenen Schadensfällen (schwarz) eingetragen.

Tabelle 5.2.1: Dosierung der Ausgangsstoffe für die Schmelzen

Nr.	Na <sub>2</sub> O [M%]	K <sub>2</sub> O [M%]	CaO [M%]	SiO <sub>2</sub> [M%]	SiO <sub>2</sub> -Träger/ Bemerkung
G1	10	35	0	55	Mikrosilika
G2	10	35	10	45	Mikrosilika
G3	10	35	20	35	Mikrosilika
G4	10	35	30	25	Mikrosilika
G5	10	35	40	15	Mikrosilika
G6	5	17,5	0	77,5	Mikrosilika
G7	5	17,5	10	67,5	Mikrosilika
G8	5	17,5	20	57,5	Mikrosilika
G9	2,5	9	0	88,5	Mikrosilika
G10	2,5	9	10	78,5	Mikrosilika
G11	2,5	9	20	68,5	Mikrosilika
G12	12,5	42,5	0	45	Mikrosilika
G13	12,5	42,5	10	35	Mikrosilika
G14	12,5	42,5	20	25	Mikrosilika
G15	20	25	0	55	Mikrosilika
G16	20	25	10	45	Mikrosilika
G17	20	25	20	35	Mikrosilika
G18	35	10	0	55	Mikrosilika
G19	35	10	10	45	Mikrosilika
G20	35	10	20	35	Mikrosilika
G21	10	35	10	45	Flint
G22	10	35	10	45	Grauwacke
G23	10	35	10	45	Kieselkalk
G24	10	35	10	45	Kieselschiefer
G25	10	35	10	45	Porphy
G26	10	35	10	45	angew. Porphy
G27	10	35	10	45	Stressquarz
G28	10	35	5	50	Mikrosilika
G29	12,5	42,5	5	40	Mikrosilika
G30	5	17,5	5	72,5	Mikrosilika
G31	12,5	42,5	10	35	Zugabe LiNO <sub>3</sub>
G32	35	10	10	45	Zugabe LiNO <sub>3</sub>
G33	45 M% Li <sub>2</sub> O		10	45	Mikrosilika

Tabelle 5.2.2: Zusammensetzung der Wassergläser

Nr.	Wasserglas	SiO <sub>2</sub> -Träger
W1	Na	-
W2	Na	Mikrosilika
W3	K	-
W4	K	Mikrosilika
W5	Na + K	-
W6	Na + K	Mikrosilika

Tabelle 5.2.3: Zusammensetzung der Proben für Lösungsversuche

Nr.	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	SiO <sub>2</sub> -Träger
C1	NaOH	-	Mikrosilika
C2	-	KOH	Mikrosilika
C3	NaOH	KOH	Mikrosilika
C4	NaOH	-	Duranglas
C5	-	KOH	Duranglas
C6	NaOH	KOH	Duranglas
C7	NaOH	-	Cristobalit
C8	-	KOH	Cristobalit
C9	NaOH	KOH	Cristobalit



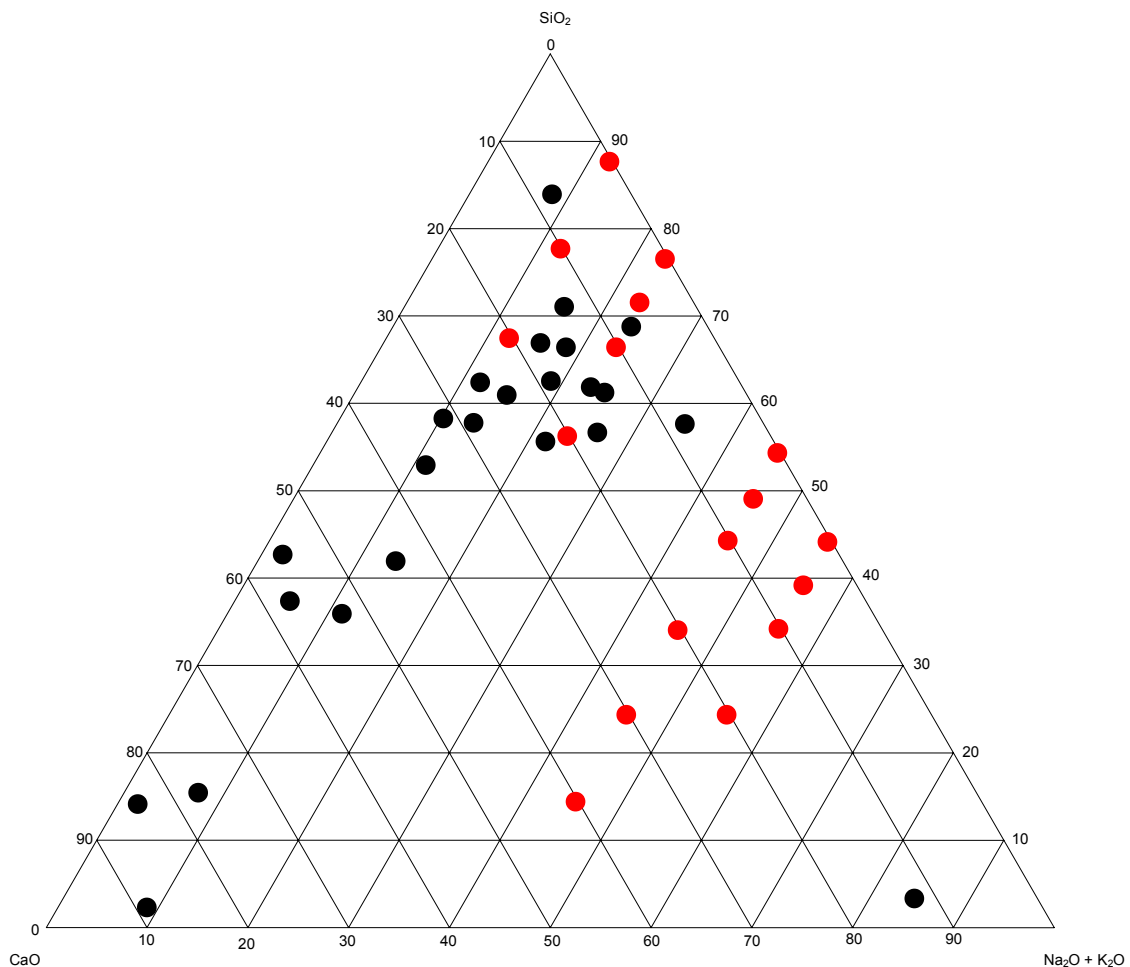


Abbildung 5.2.1: Dreistoffdiagramm mit Gelen aus Schadensfällen (schwarz) und den Proben G1 bis G20 (rot)

### Probenvorbereitung

Eine sorgfältige Probenvorbereitung ist für die Durchführung der Versuche und Auswertung der gewonnenen Ergebnisse von besonderer Bedeutung, da es sich hier aufgrund der komplizierten Probengewinnung um Einzelversuche handelt. Um unter diesen Voraussetzungen die Ergebnisse untereinander vergleichen zu können, müssen zwingend gleiche Ausgangsbedingungen für jeden Versuch vorhanden sein.

Als Ausgangsstoffe für die Gelherstellung standen Natriumkarbonat, Kaliumkarbonat, Siliciumdioxid (Microsilika) und Calciumhydroxid zur Verfügung.



Abbildung 5.2.2: Probenausgangsstoffe  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{K}_2\text{CO}_3$ , Microsilika,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$

Für die Versuche werden Alkalikarbonate anstelle der reinen Oxide verwendet. Dennoch kommt es gerade bei höheren Brenntemperaturen zu Verflüchtigungen der Alkalien, da die Zusammensetzungen nicht denen für eine ideale Glasbildung entsprechen.

Die Probenvorbereitung erfolgte in folgenden Schritten:

- Molmassenberechnung der benötigten Ausgangsstoffe zum Erreichen einer gewünschten Oxidzusammensetzung der Schmelze
- Abwiegen der Ausgangsstoffe
- Sieben der Ausgangsstoffe durch ein Sieb mit 0,5 mm Maschenweite
- Homogenisierung der Probe
- Luftdichtes Verschließen der Behältnisse und Lagerung im Exsikkator

Aus dem homogenisierten Material wird eine repräsentative Probe entnommen und unter dem Heitztischmikroskop hinsichtlich ihres Schmelzverhaltens untersucht. Für das Quellverhalten sind neben der chemischen Zusammensetzung auch die Brenntemperatur und das Brennregime von großer Bedeutung, denn dadurch wird der Gefüeaufbau ebenfalls beeinflusst. In Anbetracht dieser Tatsache ist es erforderlich, eine Hochtemperaturmikroskopie durchzuführen. Ziel war es, durch diese Herangehensweise ein ähnliches Gefüge aller Mischungen zu erzielen. Für das Schmelzen der Probe ist von den ermittelten charakteristischen Eigenschaften der Mischungen der Erweichungsbeginn von Interesse. Zu diesem Zeitpunkt ist die Reaktivität der Mischungen am höchsten und es liegen nur noch Oxide vor. Das  $\text{CO}_2$  und  $\text{H}_2\text{O}$  sind aus den Verbindungen ausgetrieben worden. Zudem wird durch das Brennen eine homogene Ausgangsstruktur erzielt. Die Proben wurden bei einem Aufheizregime, siehe Abb. 5.2.3, bis zu 1200 °C erhitzt und im Bereich ab 700 °C alle 10 K

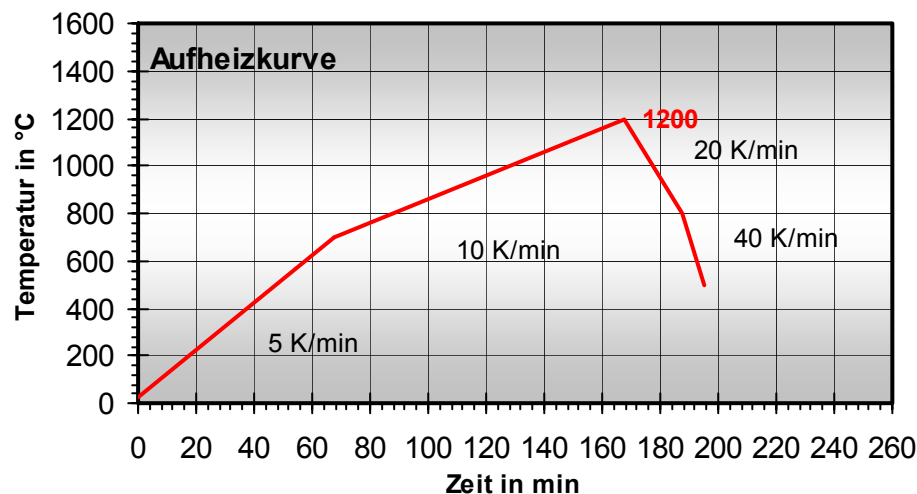
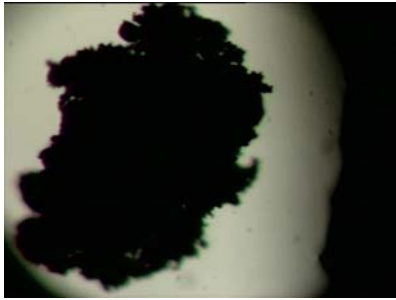


Abbildung 5.2.3: Aufheizregime Hochtemperaturmikroskopie

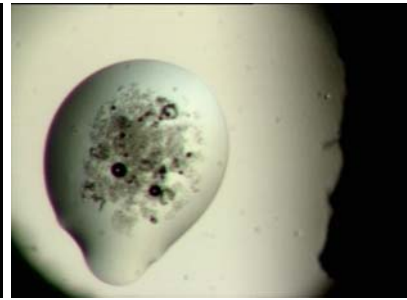
betrachtet. Ein Beispiel für eine Auswertung der Hochtemperaturmikroskopie ist im Anhang vorzufinden, anhand von drei Aufnahmen an Probe G2 (Abb.: 5.2.4) soll diese Voruntersuchung erläutert werden.



Probe G2 20°C



Probe G2 990°C  
Erweichungsbeginn



Probe G2 1040° C  
Vollständige Schmelze

Abbildung 5.2.4: Probe G1 im Heiztischmikroskop

Die Heiztischmikroskopiebilder (Abb. 5.2.4) zeigen die Probe G2 bei 20 °C, 990 °C und 1040 °C. Im Verlauf des Aufheizvorganges findet zunächst eine geringe Volumenzunahme der Probe statt, die von einem leichten Schwinden bis zum Erreichen des Erweichungsbeginns, welcher durch das Abrunden der Probekanten zu erkennen ist, gefolgt wird. Die vollständige Schmelze wird bei 1040 °C erreicht. Die gemessenen Temperaturen für diese Zustände dienen beim Brennen der gesamten Probe als Anhaltspunkte. Aufgrund des größeren Volumens des Brenngutes kann es zu leichten Abweichungen der erforderlichen Brenntemperatur kommen. Die Brenntemperatur im Ofen variierte zu dem ermittelten Erweichungsbeginn im Heiztischmikroskop um –50 K bis +20 K.

Der Brennprozess gestaltete sich wie folgend:

- Einfüllen einer geringen Menge Probematerial in den Platintiegel und anschließendes stufenweises (50 K - Schritte) Erhitzen im Ofen
- dabei wird zwischendurch der Schmelzvorgang beobachtet und bei Erreichen des Schmelzpunktes der Tiegel herausgenommen, der Ofen um 50 K heruntergefahren, die restliche Probenmenge in den Tiegel gefüllt und erneut in den Ofen eingebracht
- die Temperatur des Ofens wird 15 Min. gehalten und anschließend erneut um 50 K erhöht
- falls nötig erfolgt ein weiteres Erhöhen der Ofentemperatur bis zum vollständigen Aufschmelzen der Proben bzw. Erreichen der max. Ofentemperatur
- Abschalten des Ofens und langsames Abkühlen der Probe

Eine direkte Vergleichbarkeit zwischen den Vorgängen unter dem Heiztischmikroskop und dem Muffelofen ist nicht gegeben, da unter dem Heiztischmikroskop nur eine sehr geringe Menge unter einem definierten Temperaturregime betrachtet wird und daher innerhalb der Probe nahezu gleiche Zustände vorliegen. Im Ofen herrschen allerdings Temperaturgradienten zwischen Außen- und Innenseite der Probe, so dass nicht überall in der Probe die gleichen Bedingungen gegeben sind. Außerdem kommen hier die ablaufenden endothermen Vorgänge (Entwässerung, Decarbonatisierung, Schmelzen) viel stärker zur Wirkung, was noch eine Erhöhung des Temperaturgradienten zur Folge hat. Hierdurch wird in der Probe am äußeren Rand schon eine Alkaliabwanderung erfolgen, während dies innen noch nicht der Fall ist. Eine Reduzierung des Temperaturgradienten kann nur durch Rühren der Probe oder ein langsames Brennregime erfolgen, was aber zwangsläufig zu einer Erhöhung der Alkaliabwanderung aus dem Probematerial führt.

Dieser umständlich erscheinende Brennprozess war notwendig, da bei gleichmäßiger Steigerung der Brenntemperatur der gesamten Probenmenge infolge der Wasserabgabe des  $\text{Ca(OH)}_2$  und des Entsäuerns der Alkalikarbonate ein Aufschäumen und eventuelles Überkochen des Probematerials erfolgt, da die Gase aus der Schmelze infolge deren hoher Viskosität nur schlecht entweichen.



Abbildung 5.2.4: Probenbe- und -entnahme



Abbildung 5.2.5: Brennvorgang (1500 °C)

#### Schmelznachbereitung:

- nach der Abkühlung wird die erkaltete Schmelze vorsichtig ohne metallische Hilfsmittel aus dem Platin/Iridium-Tiegel entnommen,
- es erfolgt eine grobe Zerkleinerung,
- anschließend wird das Material in einer Scheibenschwingmühle 30 s bei 1400 U/min gemahlen,
- das Probematerial wird in luftdichten Behältern im Exsikkator aufbewahrt

Um bei den Quellmessungen eine möglichst dichte Packung der Probe im Probenraum zu erreichen, wurden diese mit destilliertem Wasser versetzt und zu einer pastösen Masse verrührt. Diese Masse kann dann ohne die Bildung von Hohlräumen in den Probenraum der Quellformen eingebracht werden. Um vergleichbare Ausgangsbedingungen zu schaffen, wurden die Proben anschließend im Probenraum wieder auf annähernd gleiche Wassergehalte getrocknet.

### 5.3 Vorversuche zur Quellmaß- und Quelldruckbestimmung

Um die in Abschnitt 5.2. vorgestellten Proben hinsichtlich ihrer Quellfähigkeit und damit ihrer Aussagefähigkeit zum Mechanismus einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion zu überprüfen, wurden zunächst eine Reihe verschiedener Vorversuche durchgeführt. Diese sollen in diesem Abschnitt nur kurz und beispielhaft wiedergegeben werden.

Die Bestimmung der Quellmaße erfolgte über den Untersuchungszeitraum in unterschiedlichen Quellformen. Wie in Abschnitt 5.1 beschrieben, kamen zunächst modifizierte Schwindrinnen und später verschiedene Rohrformen zum Einsatz.

#### Vorversuche Quellmaßbestimmung an synthetischen Gelen

Die Ergebnisse mit den zu Anfang eingesetzten modifizierten Schwindrinnen hatten zunächst orientierenden Charakter, zeigten aber schon, dass es möglich ist, an künstlich erzeugten

#### Quellmaßbestimmung in Form 1

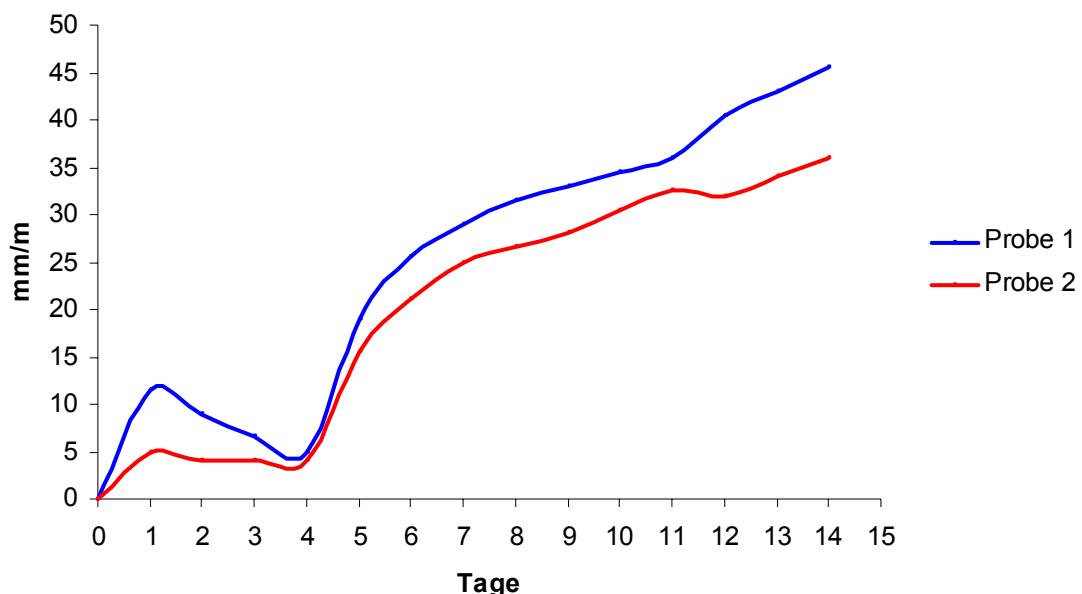


Abbildung 5.3.1: Quellmaßbestimmung in Form 1

Alkali-Kieselsäure-Gelen Quelleigenschaften zu bestimmen. In Abbildung 5.3.1 sind Quellkurven dieser ersten Messungen dargestellt. Beide Proben des künstlich erzeugten Alkalisilikat-Geles, welches eine Zusammensetzung ähnlich der Probe G3 aufwies, zeigen schon nach wenigen Minuten der Wasserzufuhr Quellerscheinungen. Deutlich ist die Abhängigkeit des Quellens von der Wasserzufuhr zur Probe zu sehen, nach einem Tag wurde bis zum vierten Messtag die Wasserzufuhr unterbrochen und beide Proben zeigen kein weiteres Quellen. Bei weiterer Zufuhr von Wasser läuft der Quellprozess unverändert fort, wie die Messung ab dem vierten Tag zeigt. Nach 14 Tagen wurden diese Messungen abgebrochen, obwohl noch kein Ende des Quellvorganges abzusehen war. Da beide Probekörper sich während des Quellvorganges auch nach oben aus den Schwindrinnen herauswölbten, wie in Abbildung 5.3.2 zu sehen, sollten die nächsten Untersuchungen in Formen mit zweiaxialer Dehnungsbehinderung vorgenommen werden. Diese ersten Versuche



in den modifizierten Schwindrinnen zeigten schon ein relativ hohes Quellmaß und somit auch die Möglichkeit, das Quellverhalten künstlich erzeugter Alkali-Silikat-Gele zu beschreiben. Nach Beendigung der Versuche wurde aus den Formen ein gelartiges Reaktionsprodukt entnommen, welches wie in Abbildung 5.3.2 zu sehen, von Rissen durchzogen war.

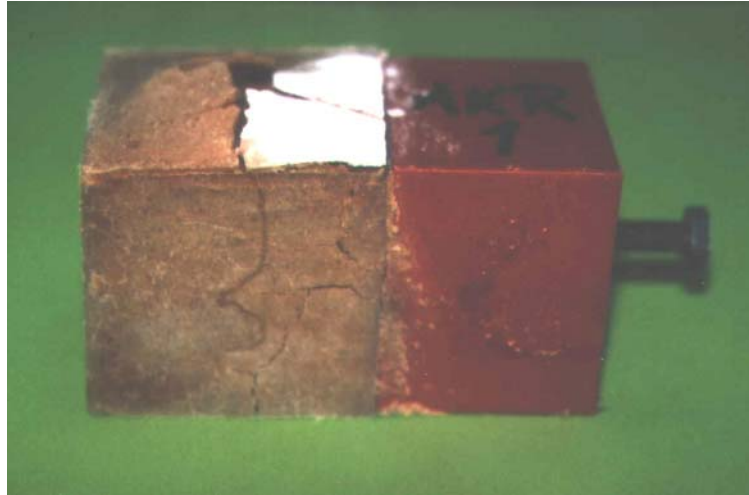


Abbildung 5.3.2: Probe 1 nach der Messung

Um ein Ausweichen der Proben, wie es in den Schwindrinnen beobachtet wurde, zu vermeiden, kamen Rohrformen mit zweiaxialer Dehnungsbehinderung zur Anwendung. Die Proben wurden wie in Abschnitt 5.2 beschrieben zusammengesetzt und hergestellt. Es wurden Quellmaße bei konstanten Alkaligehalten und wechselndem  $\text{CaO/SiO}_2$  – Verhältnis und verschiedenen Feuchteangebot bestimmt. Einige Proben erreichen deutliche Längenänderungen, ein Zusammenhang zwischen Probenzusammensetzung und Quellmaßen war jedoch noch nicht erkennbar. Zunächst kann davon ausgegangen werden, dass bei höheren C/S – Verhältnissen C-S-H – ähnliche Verbindungen entstehen können, die nicht quellfähig sind.

Die unterschiedlichen Wasserzugabemengen erzeugen auch verschiedene Quellmaße bei gleicher Probenzusammensetzung. Z. B. wird für ein C/S-Verhältnis von Null (Probe G1) nach 7 Tagen bei 10 M% Wasserzugabe ein Quellmaß von über 40 mm/m erreicht, bei einer Wasserzugabemenge von 20 M% hingegen nur ca. 10 mm/m. In weiteren Schmelzversuchen wurde das bisher eingesetzte Mikrosilika als Kieselsäurelieferant durch verschiedene Gesteinskörnungen ersetzt. So sollte überprüft werden ob durch die Quellversuche eine Einschätzung der Reaktivität der Gesteinskörnungen hinsichtlich einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion erfolgen kann (Proben G21 bis G27). Im Vergleich aller verwendeten Gesteine konnte festgestellt werden, dass sich die Ausbildung der Maxima mit Ausnahme des angewitterten Porphyrs innerhalb der ersten sieben Tage einstellte. Der angewitterte Porphyr bildete sein Maxima erst am 21. Tag der Versuchsdurchführung aus. Die Maxima der Quellmaße stellten sich zu denen der vorgestellten Quelldrücke etwas später ein. Die einzige Ausnahme stellt wieder der angewitterte Porphyr, wo Quellmaß und Quelldruck zum gleichen Zeitpunkt auftreten, dar. Alle Quellmaße liegen niedriger als erreichte Werte bei vergleichbaren Messungen an synthetischen Gelen mit Mikrosilika als Kieselsäurelieferant. Hier ist auf die, bedingt durch den Einsatz der Gesteine als Kieselsäureträger, verursachte Verunreinigung der Proben durch andere Gesteinsbestandteile hinzuweisen. Die erhaltenen

Ergebnisse lassen keine Aussage zu einer Reaktivität der einzelnen Gesteinskörnungen zu. Die Zugabe der Gesteine vor dem Schmelzen der Gläser hat zur Folge, dass die vorhandene Gesteinsstruktur und -zusammensetzung während des Schmelzprozesses zerstört wird. Überlegungen die gemahlenen Gesteine nach dem Brennprozess dem synthetischem Gel zuzugeben, scheiterten an der dann fehlenden Kieselsäure. Deshalb wird auf weitere Messungen mit diesen Proben verzichtet.

### **Vorversuche Quellmaßbestimmung an industriellen Wassergläsern**

Zunächst sollte das Quellverhalten der reinen Wassergläser beschrieben werden. Dazu wurden die Proben wie in Abschnitt 5.2 erläutert aufbereitet und in die Quellformen gegeben. Wie auch schon aus der Literatur bekannt, zeigen sich die Kaliwassergläser gegenüber dem auch als Lösungsmittel wirkendem Wasser sehr instabil. Die Proben werden in den Quellformen aufgelöst und es kommt zu keinem messbaren Quellvorgang.

Das Natriumwasserglas zeigt in Abhängigkeit der Wasserzugabemenge unterschiedliche Quellmaße. Eine optimale Wasserzugabemenge für ein maximales Quellmaß liegt bei 15 M%. Kombiniert man die Wassergläser oder mischt sie mit Mikrosilika als Kieselsäurelieferant können teilweise Quelleigenschaften beobachtet werden. Durch die Wasserzugabe erfolgt ein teilweises oder vollständiges Lösen der Wassergläser, die Lösungen reagieren alkalisch. Vergleicht man die Quellkurven der reinen Wassergläser mit denen der gemischten Proben kann jedoch nur ein Verdünnungseffekt festgestellt werden. Alle Proben, die Natriumwasserglas enthalten, zeigen eine Quellfähigkeit. Die Proben mit dem untersuchten Kaliwasserglas lösen sich wie in den vorangegangenen Versuchen auf.

Da diese Versuche nicht den erwünschten Erfolg zeigten und durch die Verwendung industrieller Wassergläser nur ein geringer Einfluss auf die Zusammensetzung der Proben erfolgen kann sowie ein Calciumeinbau in diese Wassergläser nicht möglich ist, wurde diese Versuchsreihe nicht weiter verfolgt.

### **Vorversuche Quellmaßbestimmung bei den Lösungsversuchen**

Die Proben mit gemahlenem Duranglas als Kieselsäurelieferant zeigen unabhängig von der eingesetzten Lauge eine sehr hohe Löslichkeit. In der Quellform 3 konnte ein Quellen bei allen Proben die Mikrosilika enthalten festgestellt werden. Das höchste Quellmaß von knapp über 10 mm/m erreichte eine Probe mit kombinierter Natrium-Kalium-Lauge. Die Proben mit Duranglas oder Cristobalit zeigen mit keiner der eingesetzten Laugen ein Quellen. Es konnte stattdessen bei mehreren Proben eine teilweise Auflösung festgestellt werden.

Da auch diese Versuchsreihe nicht die gewünschten Effekte zeigte und somit auch keine weiteren Rückschlüsse auf den Mechanismus einer Alkalikieselsäure-Reaktion möglich waren, wurden auch hier keine weiteren Versuche gefahren.

## 5.4 Quellmaß und Quelldruckbestimmungen

Da sich in den Vorversuchen in Abschnitt 5.3 die synthetischen Alkalisilikat-Gele als günstigste Probensubstanz für die Quellversuche ergeben haben, wurden diese in der im Abschnitt 5.1 beschriebenen endgültigen Quellform untersucht. Von Interesse war sowohl das Quellmaß als auch der zugehörige Quelldruck. Alle Proben wurden parallel zu den Quellmessungen verschiedenen in Abschnitt 5.5 aufgeführten Untersuchungsmethoden zur Beschreibung ihrer Zusammensetzung unterzogen.

### Quellmaßbestimmung an ausgewählten synthetischen Gelen

Die hier vorgestellten Messungen (Abb. 5.4.1) zeigen nicht nur die Abhängigkeit des Quellverhaltens vom Calciumanteil der Proben, sondern auch die Abhängigkeit vom Alkalianteil. In den Proben 6 bis 10 wurde dieser schrittweise zu Gunsten der Kieselsäurekomponente verringert (siehe Tabelle 5.2.1). Auf Untersuchungen mit besonders hohen

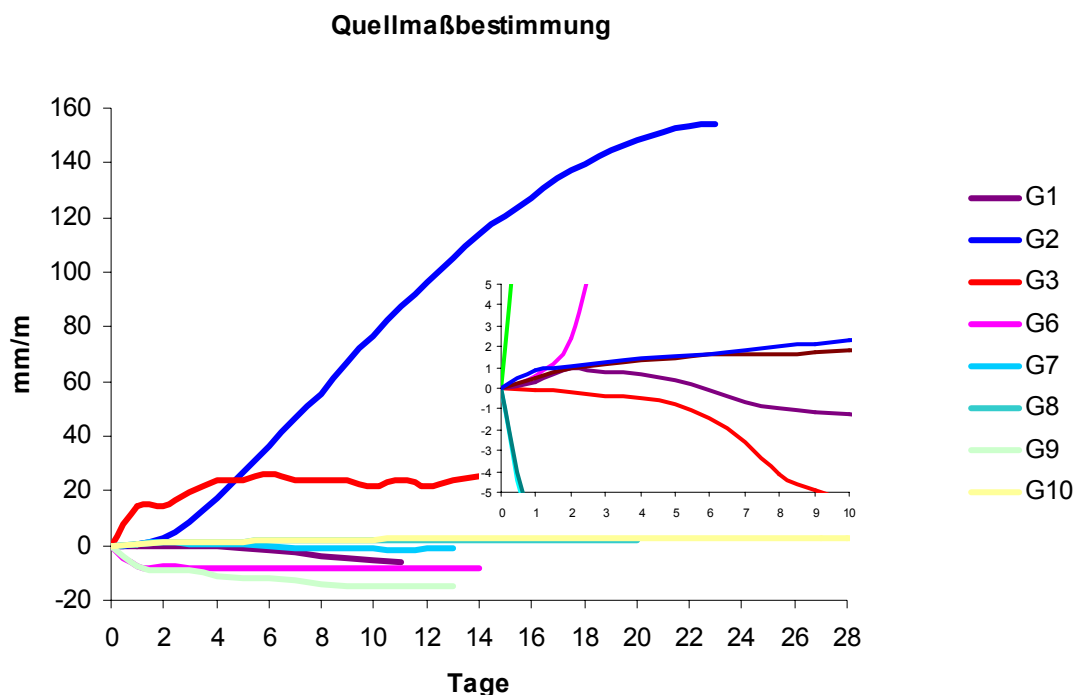


Abbildung 5.4.1: Quellmaßbestimmung an ausgewählten synthetischen Gelen

Calciumanteilen (Proben G4 und G5) wurde wegen der problematischen Probenherstellung und der geringen Aussagekraft der entsprechenden Messungen verzichtet. Auch in dieser Form, die mit einer Flüssigkeitszufuhr über einen porösen Stein arbeitet, sind Lösungsvorgänge im Probenmaterial möglich. Dies hat bei den Versuchen mit geringen Alkalianteilen und besonders denen ohne Calcium in der Probe teilweise zur vollständigen Auflösung des Probekörpers geführt. Im Quellmaßdiagramm zeichnet sich dieser Vorgang durch ein starkes Schwinden ab. Sehr deutlich zeigt sich der Einfluss des Calciumanteils bei den Messungen der Proben G1 bis G3. Ohne Calcium in der Probe findet eine Auflösung statt, mit einem geringen Calciumanteil kommt es zu starken Dehnungen und mit steigendem Anteil sinkt das erreichte Quellmaß wieder ab. Dieses Verhalten konnte so in den Messungen in den Vorgängerformen nicht beobachtet werden. Offensichtlich ist der relativ hohe Alkalianteil von 45 M% für dieses hohe Quellpotenzial verantwortlich. Die Proben G6, G7 und

G8 sind mit einem Alkalianteil von 22,5 M% hergestellt und unterscheiden sich in ihren Calciumanteilen von 0 bis 20 M%. Auch hier sind mit steigendem Calciumanteil die Proben weniger löslich und es steigt das Quellpotential an. Bedingt durch den niedrigeren Alkalianteil im Vergleich mit den Proben G1 bis G3 stellt sich auch ein deutlich niedrigeres Quellpotential ein. Das gleiche Verhalten ist bei den Proben G9 und G10 festzustellen. Diese Proben enthalten im Vergleich zu den Proben G6 bis G8 nur 11,5 M% Alkalien.

### Quelldruckbestimmung an synthetischen Gelen

Parallel zu den Messungen der Quellmaße in Form 4 wurde die Querkraftentwicklung der Proben bestimmt. In Abbildung 5.4.2 ist eine Übersicht über alle gemessenen Querkraftverläufe der Proben aus synthetischen Gelen dargestellt. Im Vergleich zu den vorangegangenen Messungen in den Vorversuchen (siehe Abschnitt 5.3) ist deutlich zu erkennen, dass in der Form 4 wesentlich höhere Querkraftspannungen gemessen werden können. In den folgenden Diagrammen wird das Verhalten der Gele bezogen auf ihre Zusammensetzung im Einzelnen diskutiert. Auf Untersuchungen mit besonders hohen Calciumanteilen (Probe G5) wurde wegen der problematischen Probenherstellung und der geringen Aussagekraft der entsprechenden Messungen verzichtet.

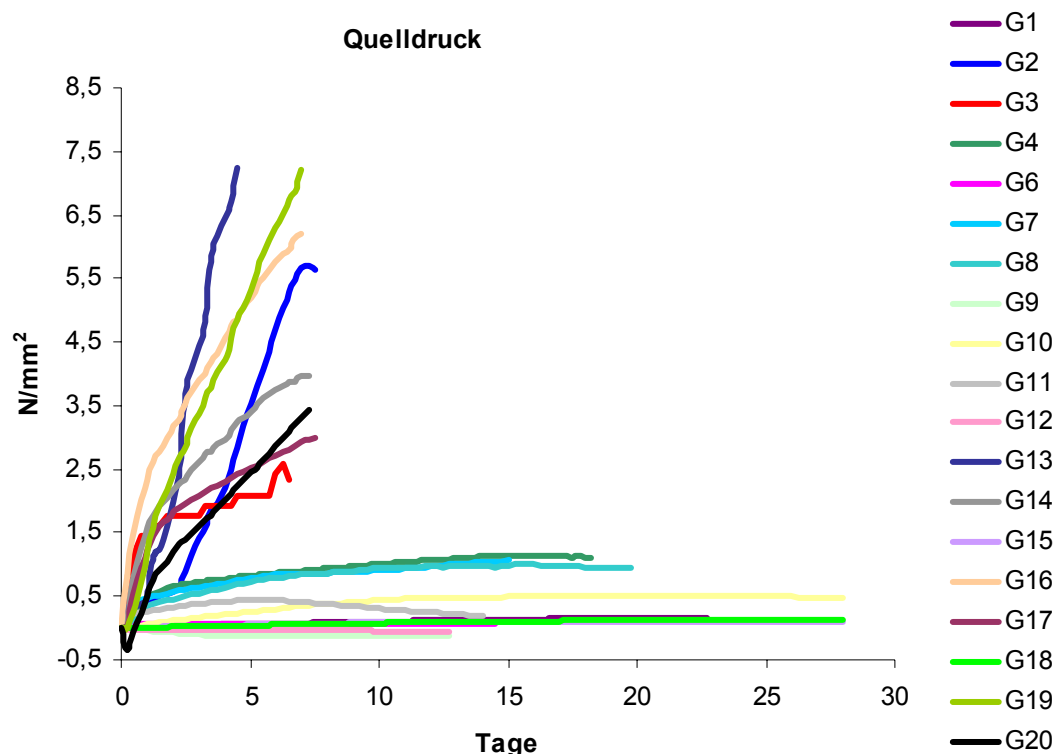


Abbildung 5.4.2: Übersicht der Quelldruckentwicklung aller Proben aus synthetischen Gelen

In Abbildung 5.4.3 sind die Querkraftspannungsverläufe der Gel-Proben mit 45 M% Alkalianteil und wechselndem C/S-Verhältnis dargestellt. Die Proben entsprechen den in Tabelle 5.2.1 angegebenen Zusammensetzungen. Die Querkraftspannungsverläufe geben das erwartete Bild wieder, ein Gel mit hohem Alkaligehalt ohne Calciumanteil, d. h. ein reines Wasserglas mit einem niedrigen Modul, zeigt eine nur geringe Querkraft bei einer sehr hohen Löslichkeit. Wird in dieses Wasserglas Calcium eingebaut, sinkt die Löslichkeit und steigt die Querkraftfähigkeit des Gels, bis der Calciumanteil einen Grenzwert erreicht. Bei zu hohen

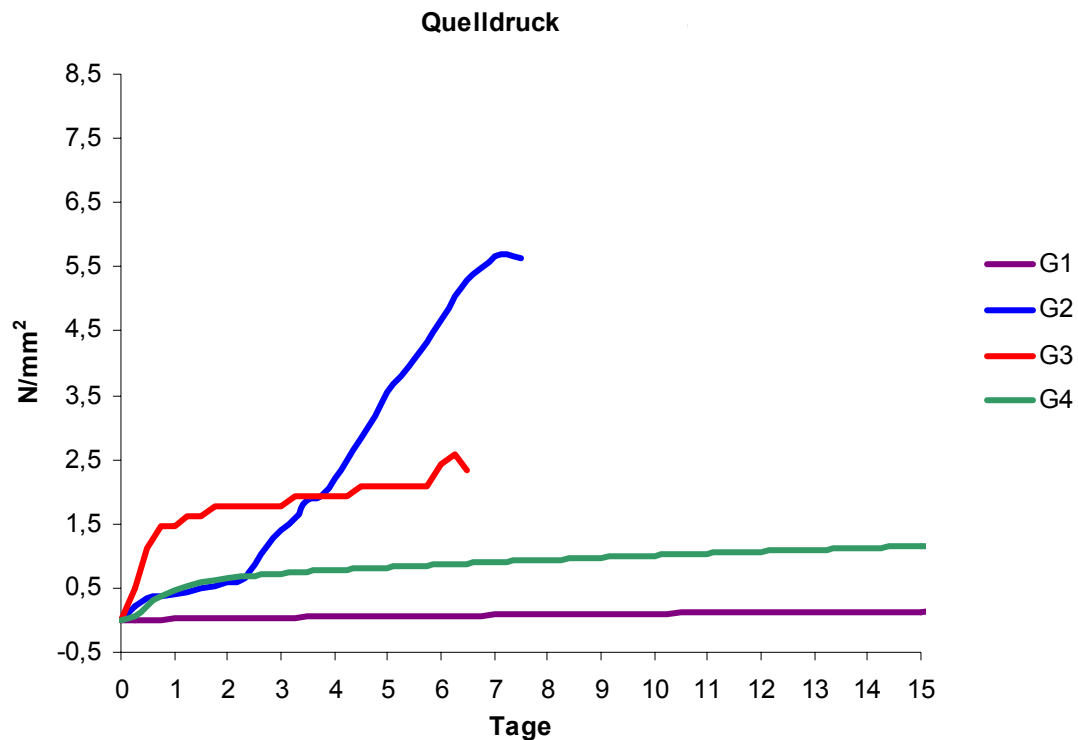


Abbildung 5.4.3: Quelldruckentwicklung der Proben G1 bis G4

Calciumanteilen wird die erreichte maximale Quellspannung der synthetischen Gele niedriger im Vergleich zu Gelen mit geringeren Calciumanteilen. Die Quellspannungsverläufe der Proben G2 bis G4 geben diesen Sachverhalt wieder.

Wird der Alkaligehalt in den synthetischen Gelen verringert, sinkt auch der Quelldruck, der bei

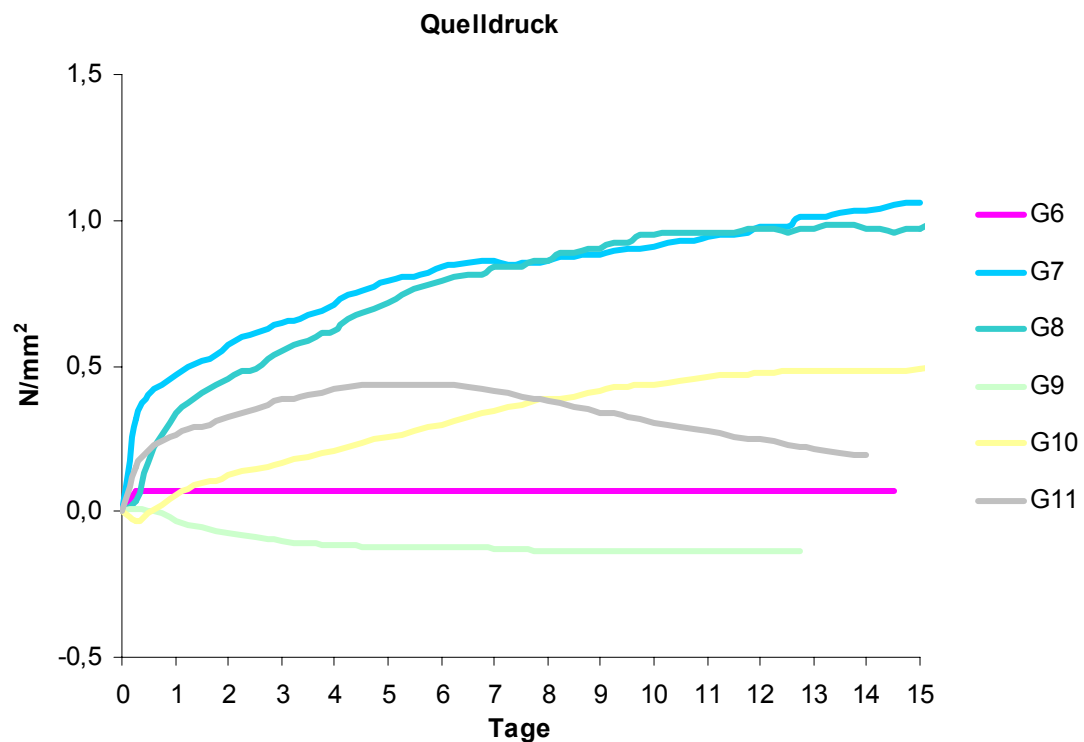


Abbildung 5.4.4: Quelldruckentwicklung der Proben G6 bis G11



Wasseraufnahme von ihnen ausgeübt werden kann. Die Proben G6 bis G11 in Abbildung 5.4.4 weisen alle geringere Alkaliegehalte als die Proben G1 bis G4 auf. Der Einfluss des Calciumgehaltes im Gel bildet sich vergleichbar zu Proben mit höheren Alkaliegehalten aus.

Eine Erhöhung der Alkaliegehalte in Bezug auf die Proben G1 bis G4 zeigt bei den stabilen Proben einen schnelleren Quelldruckaufbau mit geringfügig höheren Endwerten. In Abbildung 5.4.5 ist die Quellkraftentwicklung der entsprechenden Proben G12 bis G14 dargestellt. Der

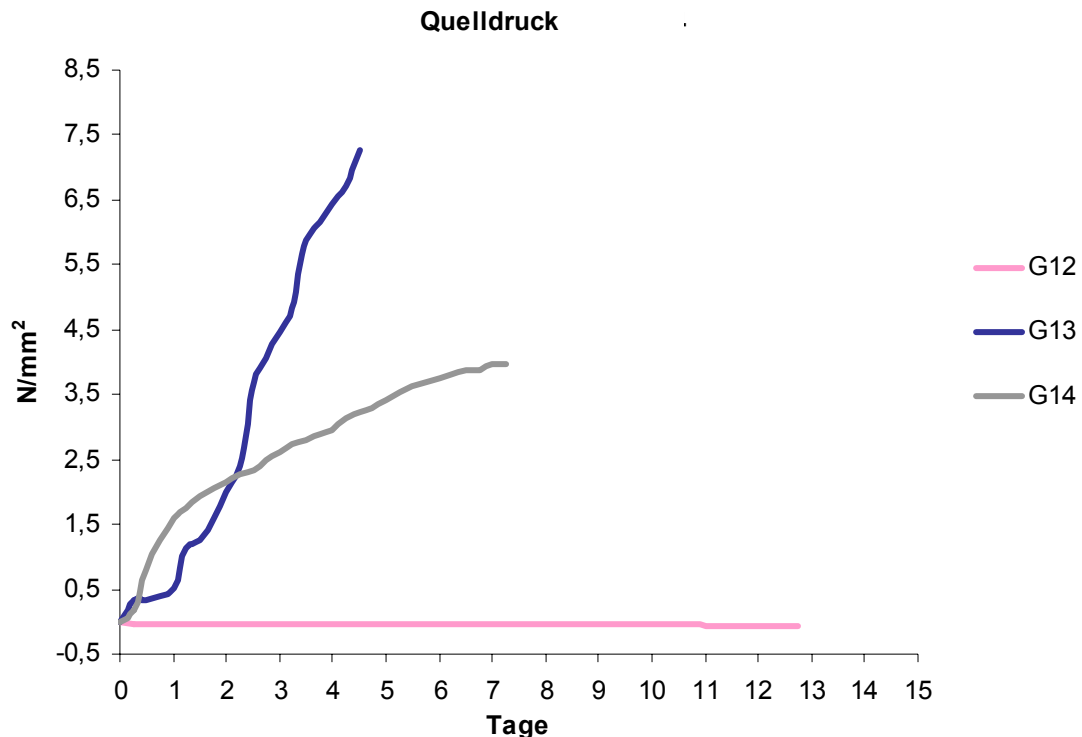


Abbildung 5.4.5: Quelldruckentwicklung der Proben G12 bis G14

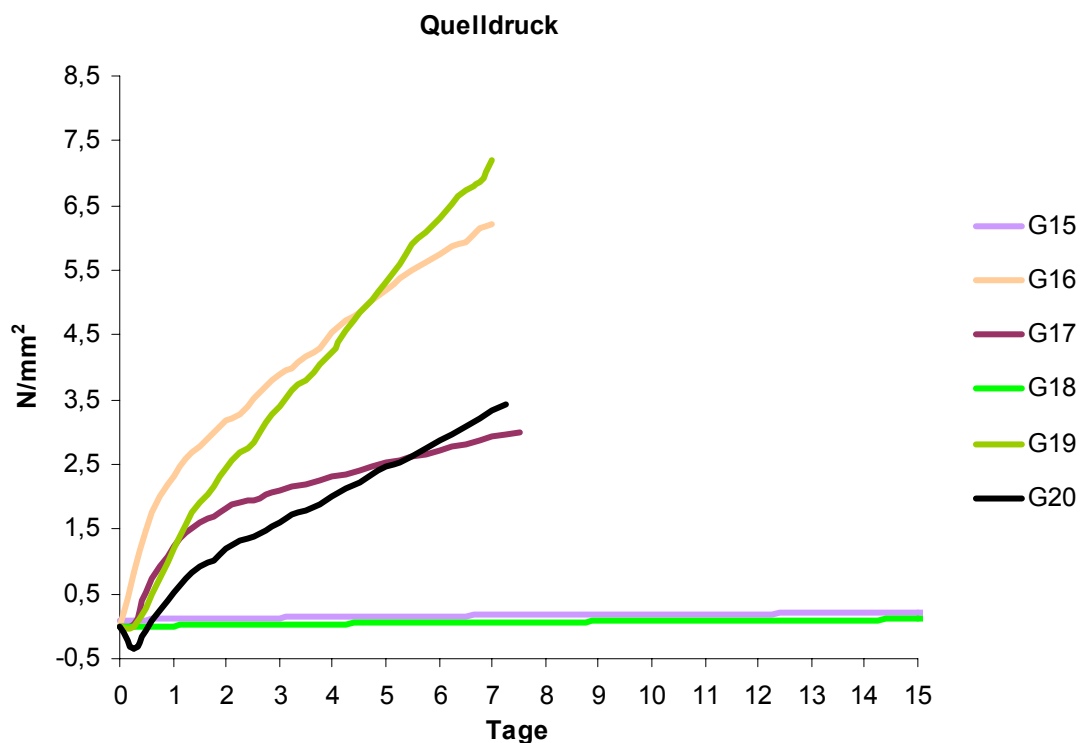


Abbildung 5.4.6: Quelldruckentwicklung der Proben G15 bis G20

Einfluss des Calciumgehaltes im Gel bildet sich wieder vergleichbar zu allen vorher betrachteten Proben aus, d. h., dass die Ca-freie Probe G12 nicht quellfähig ist.

Variiert man das Verhältnis der Alkalien bei einem insgesamt konstanten Alkaligehalt von 45 M% in der Probe, erhält man die in Abbildung 5.4.6 dargestellten Quellkraftverläufe.

Wiederum zeigen die Proben ohne Calcium keine nennenswerte Quellkraft, da die Wasseraufnahme von Lösungsvorgängen der Proben überlagert werden. Die stabilen Verbindungen hingegen zeigen einen deutlichen Quellkraftaufbau. Die Proben G16 und G19 unterscheiden sich lediglich durch ihr Alkaliverhältnis im Gel von der Probe G2 und bauen wie diese hohe Quellkräfte auf. Die Proben G17 und G20 bleiben mit ihrem höheren C/S-Verhältnis unter diesen Werten. Dieses Verhalten entspricht prinzipiell der Probe G3, die sich wieder nur durch ihr Alkaliverhältnis von G17 und G20 unterscheidet. In Abbildung 5.4.7 ist das Quellverhalten von den Proben G28 bis G30 dargestellt. Diese Proben haben einen Calciumgehalt von 5 M% und der Alkaligehalt wird variiert. Es ist zu erkennen, dass je nach Alkalianteil in den Proben die Quellkraftentwicklung bei diesem geringen Calciumgehalt sehr unterschiedlich ausfällt. Die

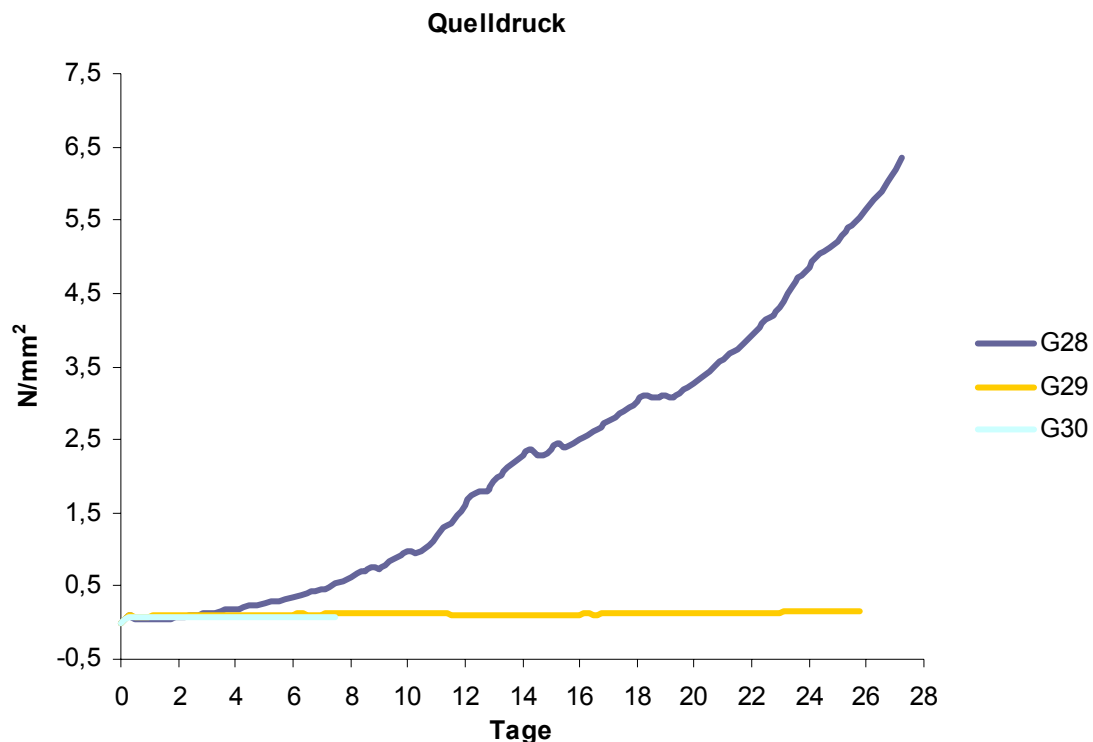


Abbildung 5.4.7: Quelldruckentwicklung der Proben G28 bis G30

Proben G29 und G30 kann man mit den Proben G6 und G13 vergleichen, sie unterscheiden sich nur im Calciumanteil. Die Proben G30 und G6 zeigen kein Quellen, da der Alkalianteil zu gering ist. Die Probe G29 ist durch ihren sehr hohen Alkalianteil aber den geringeren Ca-Anteil gegenüber Probe G13 sehr leicht löslich und dadurch nicht quellfähig. Die Probe G28 ist mit der Probe G2 vergleichbar und unterscheidet sich nur durch einen etwas niedrigeren Ca-Gehalt. Beide Proben erreichen fast identische Quellkräfte, die sich lediglich durch ihren zeitlichen Verlauf geringfügig unterscheiden. In einer weiteren Versuchsreihe sollte der Einfluss von Lithium auf das Quellverhalten von synthetischen Gelen bestimmt werden. Es wurden zwei Proben (G31 und G32) mit einer 30 %igen Lithiumnitratlösung beaufschlagt und eine Probe mit Lithiumoxid hergestellt (G33).

Diese Proben G31 und G32 entsprechen in ihrer Zusammensetzung den Proben G13 und G19, werden aber statt mit destilliertem Wasser mit Lithiumnitratlösung in die Quellform

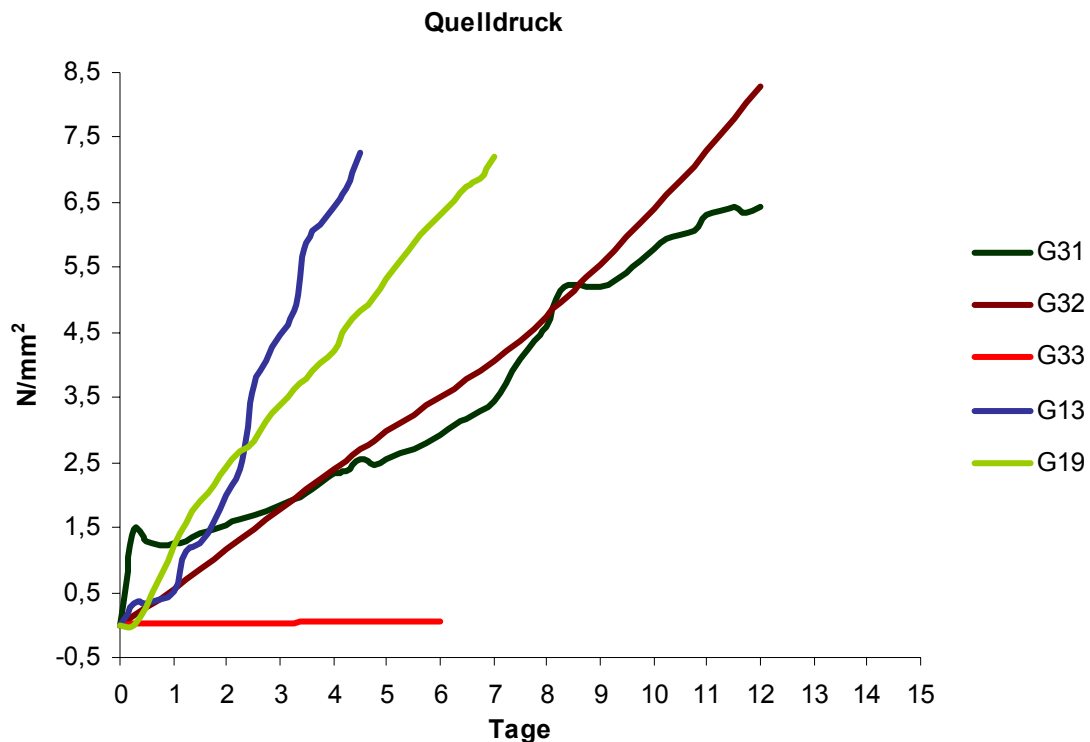


Abbildung 5.4.8: Quelldruckentwicklung der Proben G31 bis G33

eingbracht. Die Probe G33 enthält statt Natrium und Kalium Lithium als Alkalikomponente. In Abbildung 5.4.8 ist das Quellverhalten dieser Proben dargestellt.

Es ist zu erkennen, dass die eingebrachte Lithiumnitratlösung auf die mit Natrium und Kalium hergestellten Proben keinen entscheidenden Einfluss auf deren Quellverhalten hat. Wie bei den Proben G13 und G19 stellt sich ein deutlicher Quelldruck ein. Die Quellschwellverläufe der Proben G13 und G19 sind zum Vergleich mit in das Diagramm eingetragen. Dieses Verhalten lässt sich mit den vorhandenen Konzentrationen erklären. Es befinden sich 55 % bzw. 45 % Natrium und Kalium in den Proben, über die Lithiumnitratlösung werden aber nur ca. 6 % Lithium zugeführt. Somit wird das optimale Verhältnis Lithium / Alkalien von 0,74 nicht erreicht und es kann somit die Wirkung nicht erzeugt werden. Die Probe G33 bestätigt die Wirkungsweise von Lithiumsalzen auf eine AKR [32], [39] und zeigt eindeutig, dass ein Lithiumsilikathydrat nicht quellfähig ist.

### Wiederholungsmessungen

Um die Aussagekraft und Wiederholbarkeit der in diesem Abschnitt vorgestellten Versuche zu überprüfen, wurden Wiederholungsmessungen durchgeführt. Eine Serienmessung ist aufgrund der zeitaufwendigen Herstellung der Proben im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich gewesen. Beispielhaft sind in den Abbildungen 5.4.7 und 5.4.8 die Kurvenverläufe der Quellschwellentwicklung ausgewählter Proben dargestellt. Die Wiederholungsmessungen sind mit dem Zusatz „wdh“ gekennzeichnet und teilweise in einem zweiten Labor von einem anderen Bearbeiter durchgeführt worden. Alle fünf Proben zeigen einen qualitativ ähnlichen Verlauf, wobei die Wiederholungsmessungen, im Gegensatz zu den Erstmessungen, nicht nach einer bestimmten Messdauer abgebrochen, sondern über einen längeren Zeitraum mit

Rückstellproben gemessen wurden. Es ist zu vermuten, dass es durch die Lagerung zu geringen Veränderungen, z. B. durch eine Feuchtaufnahme, in den Proben gekommen ist, welche sich teilweise in einer verzögerten Reaktion abzeichnen. Die längere Messdauer ermöglicht es den Proben, einen höheren Quelldruck gegenüber den Erstmessungen zu erreichen.

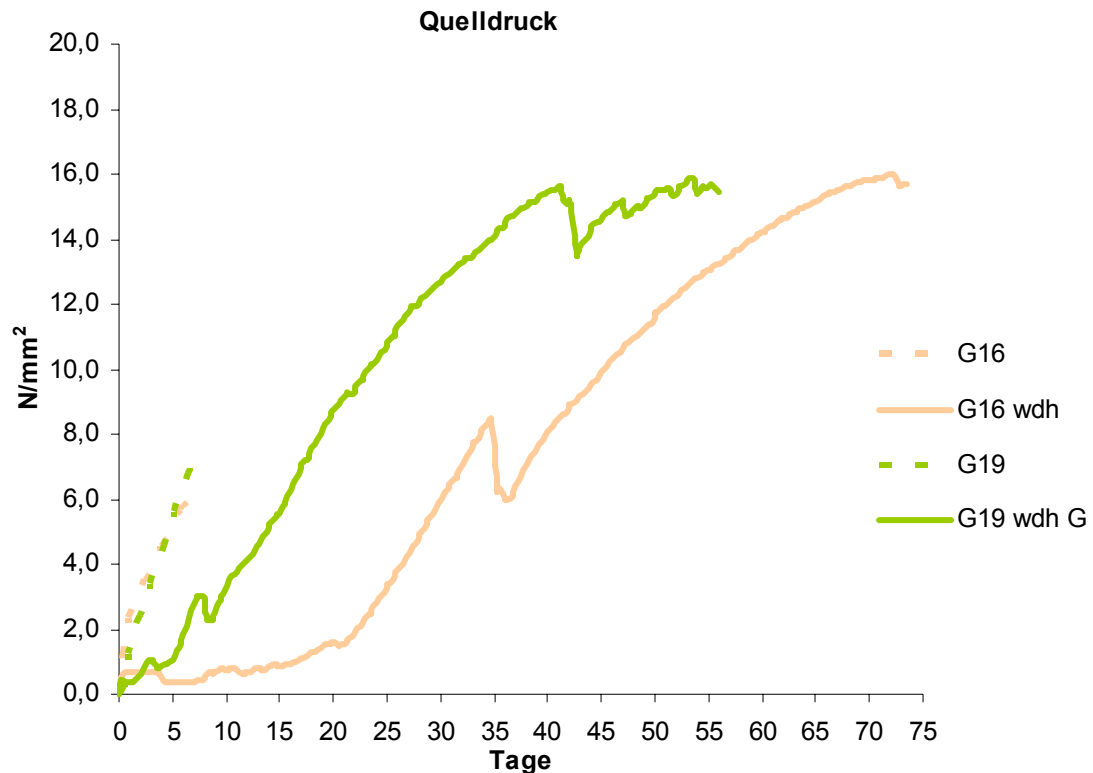


Abbildung 5.4.7: Wiederholungsmessungen der Proben G16 und G19

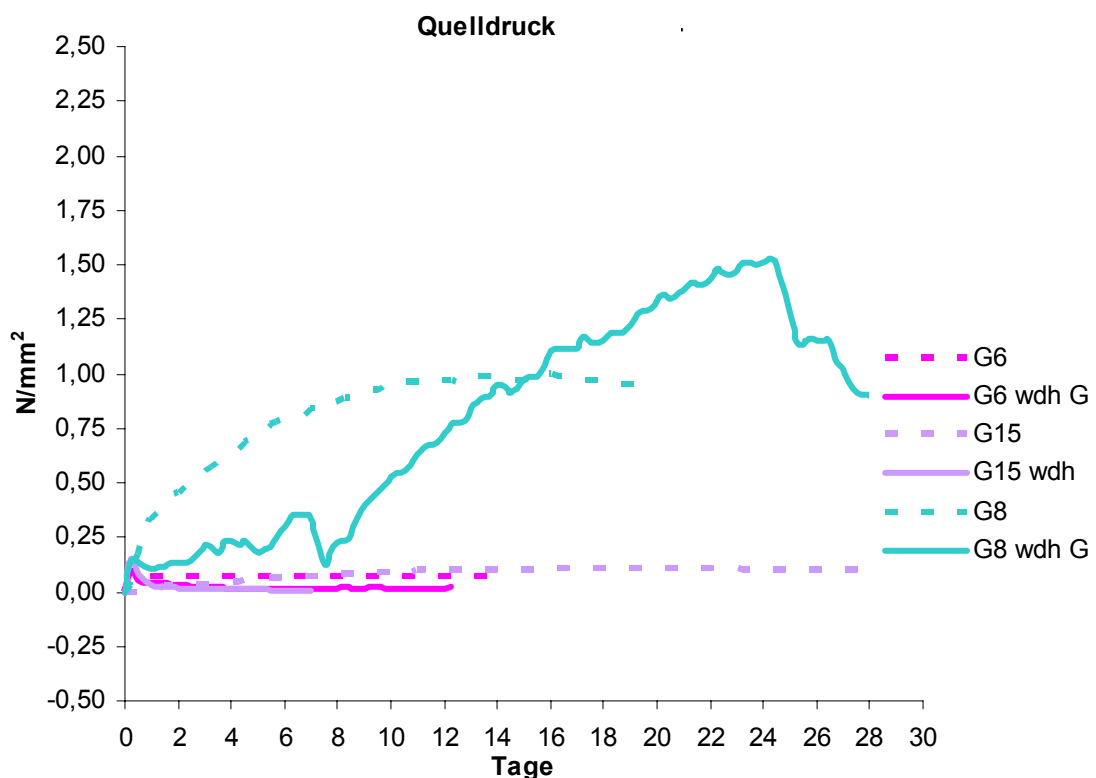


Abbildung 5.4.8: Wiederholungsmessungen der Proben G6, G8 und G15

## 5.5 Auswertung und Zusammenfassung

### Auswertung

In den Vorversuchen zeigte sich, dass die Versuchsreihen mit industriellen Wassergläsern und die Lösungsversuche nicht die erwünschten Aussagen liefern. Aus diesem Grund wurde in den Hauptversuchen das Quellverhalten der synthetischen Gele genauer untersucht. Bei diesen Messungen decken sich die Quelldruckergebnisse mit den Ergebnissen aus der Quellmaßbestimmung. Die Proben mit hohen Alkalianteilen können eine hohe Quellkraft entwickeln, dabei ist ihre Stabilität vom Calciumgehalt abhängig. Je nach Zusammensetzung übersteigen die erreichten Quellkräfte deutlich die Zugfestigkeit von Gesteinskörnern bzw. der Zementsteinmatrix (siehe auch Abschn. 6).

Proben ohne Calcium, d.h. reine Wassergläser, können bedingt durch ihre hohe Löslichkeit keinen Quelldruck aufbauen, dagegen verringern hohe Calciumgehalte das Quellvermögen. Der bekannte Grenzbereich um 30 % Calcium kann in den durchgeführten Versuchen bestätigt werden. Geringe Alkalianteile erzeugen bei Stabilität der Probe (durch Calciumanteile in der Probe erzeugt) auch nur niedrige Quelldrücke. Somit kann mit diesen gewonnen Erkenntnissen folgender Bereich einer Quellfähigkeit im Dreistoffdiagramm, welches schon im Abschnitt 5.2.1 vorgestellt wurde, eingegrenzt werden. Dabei wurden wie schon im Abschnitt 5.2 die Alkalien als Summe  $K_2O + Na_2O$ , also nicht als  $Na_2O$ -Äquivalent, zusammengefasst.

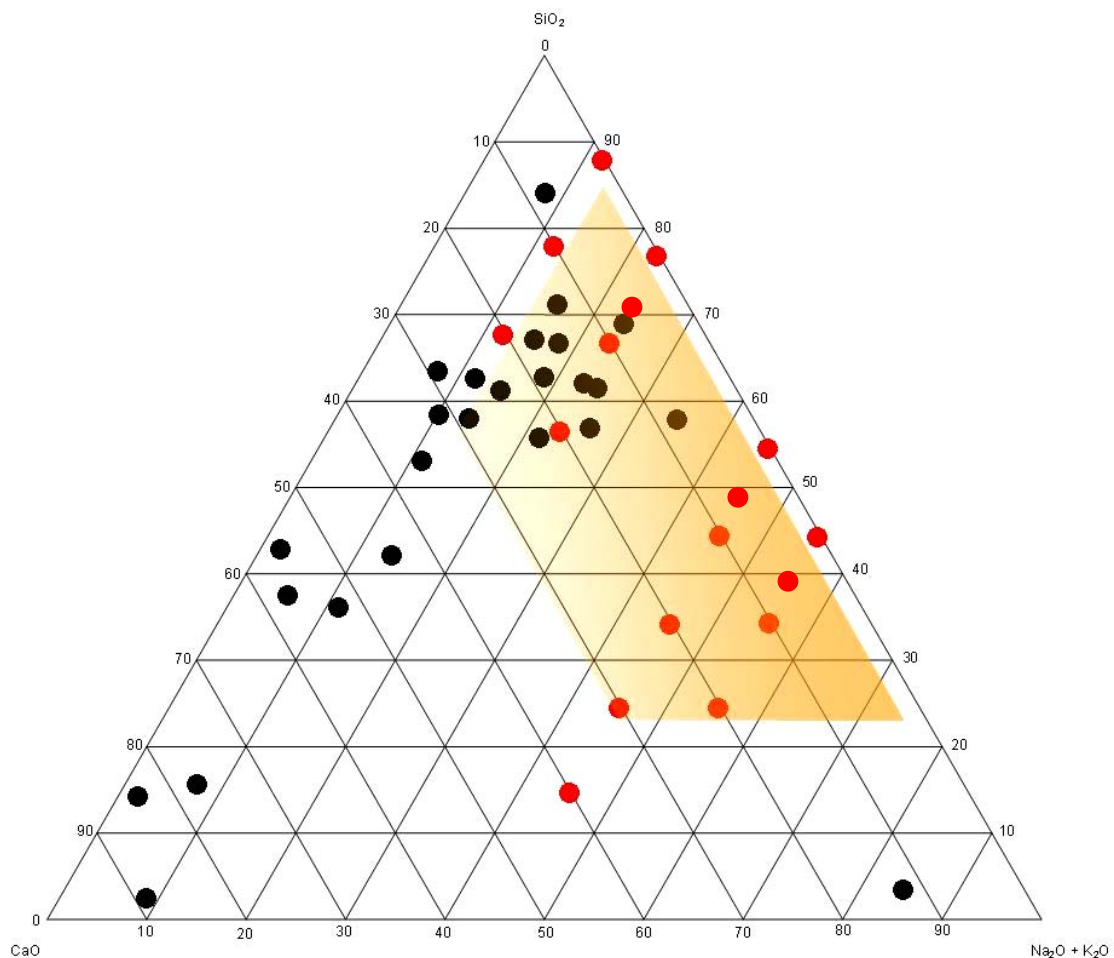


Abbildung 5.5.1: Bereich quellfähiger Alkali-Silikat-Gele



Die roten Punkte geben die Position der in dieser Arbeit hergestellten Proben wieder und die schwarzen Punkte sind beispielhaft eingetragene Zusammensetzungen von Gelen aus Schadensfällen. Es wird hier deutlich, dass sehr oft die gefundenen Gele aus Schäden schon eine stark von einer Quellfähigkeit abweichende Zusammensetzungen aufweisen, also einer Alterung bzw. einer stetigen Veränderung ihrer Zusammensetzung je nach den angebotenen Reaktionspartnern unterliegen.

Um das in den Abschnitten 5.3 und 5.4 beschriebene Quellverhalten der untersuchten Proben erklären zu können, wurden begleitend zu den Quellmessungen eine Reihe von Untersuchungen durchgeführt. Dazu gehören neben den in Abschnitt 5.2 vorgestellten Untersuchungen zur Vorbereitung der Proben die Bestimmung des Phasenbestandes vor und nach den Quellversuchen mittels XRD, die Bestimmung der Oxidzusammensetzung über EDX und die Beschreibung des Gefüges der entstandenen Gele mit Hilfe der REM und ESEM. Als weitere Untersuchungsmethoden wurden die DTA zur Ermittlung der materialtypischen Stoffumwandlungstemperaturen und die Bestimmung der Löslichkeit der Proben durchgeführt. An einigen Proben sollen die Untersuchungsergebnisse exemplarisch dargestellt werden, alle ermittelten Daten befinden sich in tabellarischer Form im Anhang.

### **XRD**

Die röntgendiffraktometrischen Untersuchungen dienen der Bestimmung der in den Proben enthaltenen mineralischen Bestandteile. Hierfür ist eine kristalline Struktur dieser Mineralien Voraussetzung. Ein Großteil der Proben besitzt allerdings gerade bei den kalkärmeren Proben eine amorphe bzw. mikrokristalline Struktur, welche nur schwache Signale mit sehr hohem Untergrund liefern. In den Analysen sind nicht alle Reflexe zuordenbar, d. h. es sind Verbindungen entstanden, für die keine Referenzdateien vorhanden sind. Daher sind diese Ergebnisse zwangsläufig nicht sehr aussagekräftig, dennoch wurden alle Proben mit dieser Methode sowohl vor, als auch nach dem Quellversuch untersucht. In Tabelle 5.5.1 erfolgt eine Zuordnung welche Struktur bzw. welcher Phasenbestand ermittelt werden konnte. Anhand von einigen ausgewählten Proben sind im folgenden Abschnitt die gewonnen Erkenntnisse dargestellt.

Die XRD-Analysen der unhydratisierten und hydratisierten Proben G1 bis G3 zeigen einen stark erhöhten Untergrund, was die amorphe Struktur des Materials gut wiedergibt. Die Röntgenreflexe sind aufgrund der deutlich glasigen Struktur nicht sehr aussagekräftig und liefern nur wenige verwertbare Aussagen über die Zusammensetzung der Proben. Es wurden Calcit, Quarz, ein Kaliumkarbonathydrat und ein Kaliumcalciumsilikat bestimmt. Aus der Probenzusammensetzung ist die Entstehung dieser Verbindungen möglich und somit auch erklärbar. Es kann lediglich bei allen drei Proben eine Abnahme der Röntgenreflexe von unhydratisiert zu hydratisiert festgestellt werden. Dies ist mit dem in Lösung gehen der Wassergläser während der Quellversuche zu erklären.

Die Untersuchungen der Probe G4 zeigen bei der unhydratisierten Probe etwas andere Röntgenreflexe. Es lassen sich einige Minerale zuordnen, die auch bedingt durch die eingesetzten Ausgangsmaterialien während des Brennvorganges entstehen können. Der gefundene Portlandit und der Calcite deuten auf einen unplanmäßigen Kontakt der Probe mit Feuchtigkeit während der Lagerung hin. Ebenfalls zeigen diese beiden Phasen, dass nicht das komplette Calcium der Ausgangsmischung in das Glas eingebaut wurde. Dieser Effekt

Tabelle 5.5.1: generelle Übersicht über den ermittelten Phasenbestand

Nr.	Phasenbestand		
	röntgenamorph	kristalline Bestandteile	kristalline Bestandteile, nicht identifizierbar
G1	x		
G2		x	
G3		x	
G4		x	
G6	x		
G7	x		
G8	x		
G9		x	
G10	x		
G11	x		
G12	x		
G13			x
G14			x
G15	x		
G16	x		
G17			x
G18	x		
G19			x
G20			x
G28			x
G29			x
G30			x
G31			x
G32			x
G33		x	

Tabelle 5.5.3: korrigierte Oxidzusammensetzungen

Nr.	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	CaO	SiO <sub>2</sub>
	[M%]	[M%]	[M%]	[M%]
G2	10	35	9,3	41,3
G3	10	35	19,4	32,5
G4	9,3	28,5	15,7	24,8
G9	2,5	9	0	86,2

Tabelle 5.5.2: quantitativer Phasenbestand

Nr.	Phasenbestand	
G2	1,3 %	Calcit
	2,3 %	Cristobalit
	1,4 %	Quarz
G3	1,0 %	Calcit
	0,6 %	Korund
	0,9 %	Cristobalit
	1,6 %	Quarz
G4	16,5 %	Bütschliit
	2,8 %	Calcit
	2,5 %	Pirssonit
	10,8 %	Portlandit
	0,2 %	Quarz
G9	0,6 %	Calcit
	1,6 %	Korund
	1,4 %	Cristobalit
	0,9 %	Quarz
G33	4,0 %	C <sub>2</sub> S
	0,4 %	Cristobalit
	21,1 %	Li <sub>2</sub> CaSiO <sub>4</sub>
	57,0 %	Li <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>

wird bei Proben mit sehr hohen Calciumgehalten beobachtet. Analog zu den Proben G1 bis G3 kann auch hier eine starke Abnahme der Reflexe nach der Hydratation beobachtet werden. Die Analysen der Probe G9 zeigen bei der XRD-Analyse, wie bei einem Silikatgehalt von

88,5 % zu erwarten, verschiedene SiO<sub>2</sub>-Modifikationen. Diese können auch in der DTA dieser Probe (Abb. 5.5.18) nachgewiesen werden. Es handelt sich hierbei um Quarz, Tridymit und Cristobalit. Auffällig ist, dass die Kurvenverläufe sowohl vor, als auch nach dem Quellversuch nahezu identisch sind. Das trifft auch für die Messungen an Probe G12 zu, was bedeutet, dass während des Versuches mit diesem Verfahren keine oder kaum messbare Veränderungen in der Struktur des Materials erfolgten. In der Probe G12 kann sowohl vor als auch nach dem Quellversuch Quarz nachgewiesen werden. Da die teilweise vorgefundenen kristallinen Anteile in den Proben einen Einfluss auf deren Gesamtzusammensetzung haben, soll der vorhandene Anteil quantitativ mittels XRD-Rietveld ermittelt werden. Dazu wurden bei den Proben wo eine Zuordnung des Phasenbestandes möglich war der prozentuale Anteil ermittelt. In Tabelle 5.5.2 sind die errechneten Werte dargestellt. Wird dieser Phasenbestand auf die Oxidzusammensetzung der entsprechenden Proben angerechnet, ergeben sich die in Tabelle 5.5.3 angegebenen korrigierten Zusammensetzungen dieser Proben.

### REM EDX

Für die Untersuchungen unter dem Elektronenmikroskop wurden zum einen die noch nicht hydratisierten Proben des gebrannten Ausgangsmaterials, als auch die hydratisierten Proben nach Ablauf der Quelldruckversuche verwendet. Es wurde die Struktur und die Zusammensetzung der Proben untersucht. In Abbildung 5.5.1 sind zwei Aufnahmen der Struktur der Probe G1 vor und nach dem Quellversuch dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass eine Veränderung von körnig zu glasig/amorph stattgefunden hat. Die Ergebnisse der EDX-Analyse (siehe Tab. 5.5.4) zeigen in der Integralmessung leicht schwankende Gehalte der Ausgangsstoffe vor Versuchsbeginn, die aber die angestrebte Zusammensetzung hinreichend abbilden. Nach Beendigung des Quellversuchs liegt die Oxidzusammensetzung der Probe etwas deutlicher an der Sollzusammensetzung (siehe Abschn. 5.2). In Abbildung 5.5.2 sind zwei Strukturaufnahmen der Probe G2 vor und nach dem Quellversuch zu sehen. Hier ist ebenfalls die Veränderung von körniger Struktur hin zu einem glasigen Gefüge erkennbar. Die EDX-Analysen zeigen wie schon bei Probe G1 vor dem Quellversuch in der Integralmessung leichte Abweichungen von der Sollzusammensetzung, die sich nach Beendigung des Quellversuches verringern. Die Werte befinden sich in Tabelle 5.5.4. Zwei typische Aufnahmen der Probe G3 sind in Abbildung 5.5.3 dargestellt. Durch den höheren Calciumgehalt dieser Probe sind sowohl vor als auch nach dem Quellversuch stärker strukturierte

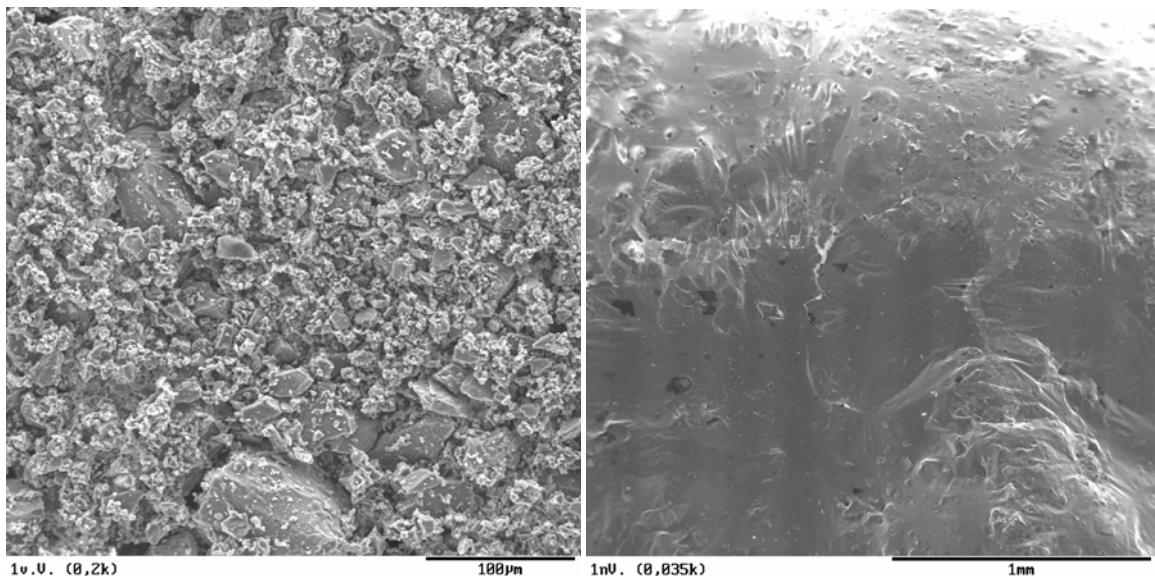


Abbildung 5.5.1: REM-Aufnahme Probe G1 vor und nach dem Quellversuch

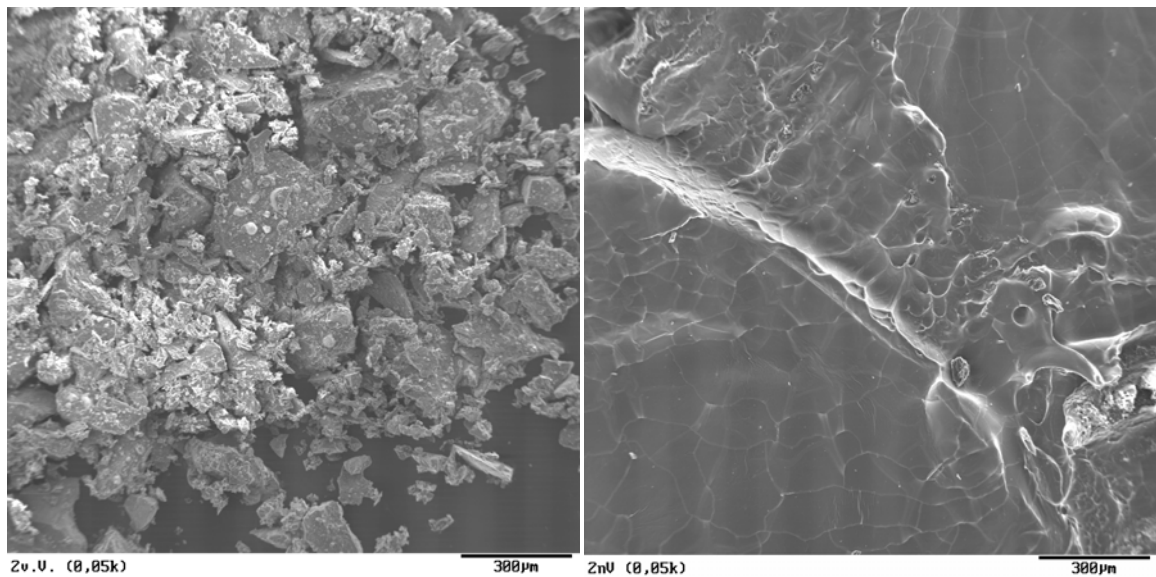


Abbildung 5.5.2: REM-Aufnahme Probe G2 vor und nach dem Quellversuch

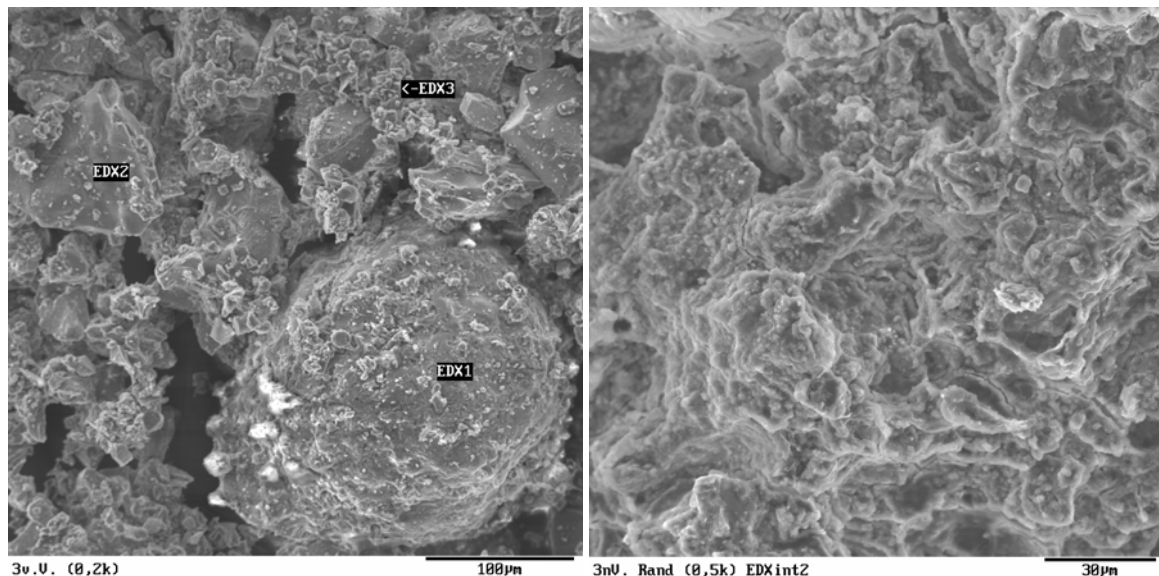


Abbildung 5.5.3: REM-Aufnahme Probe G3 vor und nach dem Quellversuch

Oberflächen als bei den Proben G1 und G2 zu erkennen. Wobei sich auch hier trotz der unterschiedlichen Auflösung der Aufnahmen eine Verdichtung und ein „Zusammenwachsen“ des Gefüges am Ende der Quellmessungen zeigen. Die Ergebnisse der EDX-Integralmessung sind Tabelle 5.5.4 zu entnehmen. Noch stärker ist der Einfluss höherer Calciumgehalte in den Aufnahmen der Probe G4 (Abbildung 5.5.4) mit 30% CaO zu erkennen. Vor dem Quellversuch ist die Probe ein verschiedenkörniges Granulat, nach dem Versuch sind die größeren Körner noch immer zu erkennen und es hat sich eine feinkörnige bis amorphe Matrix gebildet. Die Oxidzusammensetzung der Probe vor und nach dem Quellversuch ist ebenfalls in Tabelle 5.5.4 aufgeführt und zeigt nur sehr geringe Veränderungen. Die REM-Aufnahme der Probe G9 vor dem Quellversuch (Abbildung 5.5.5) zeigt eine scherbenartige glasige Struktur, die sich nach Versuchsende mit angelösten Kanten und zum Teil mit einem Film überzogen darstellt. Hier wirken vermutlich der sehr niedrige Alkaligehalt und das fehlende Calcium in der Probe gegenläufig. Der niedrige Alkaligehalt



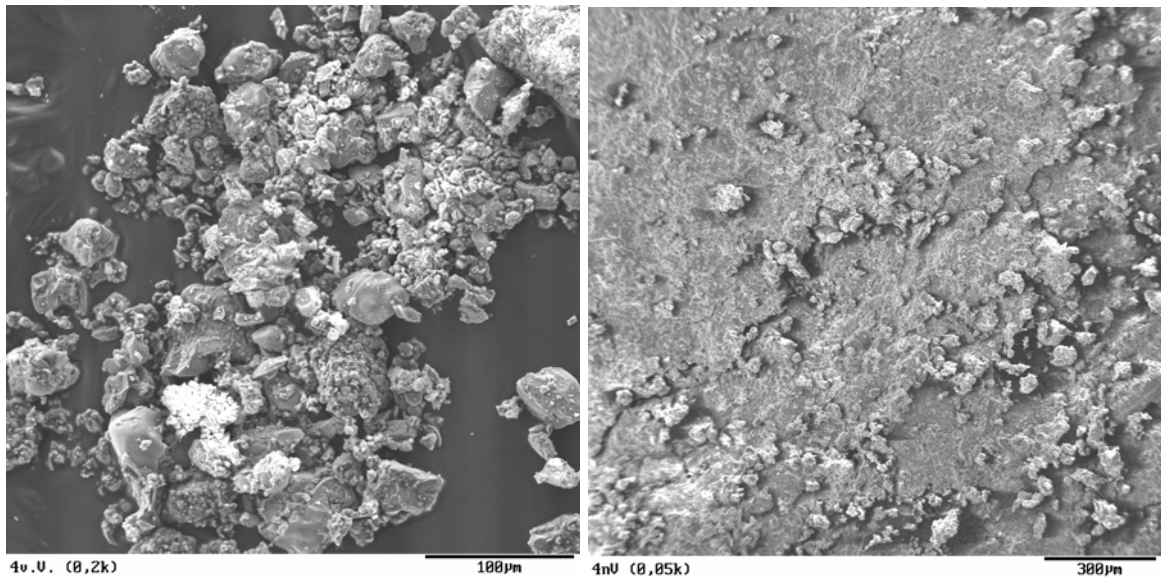


Abbildung 5.5.4: REM-Aufnahme Probe G4 vor und nach dem Quellversuch

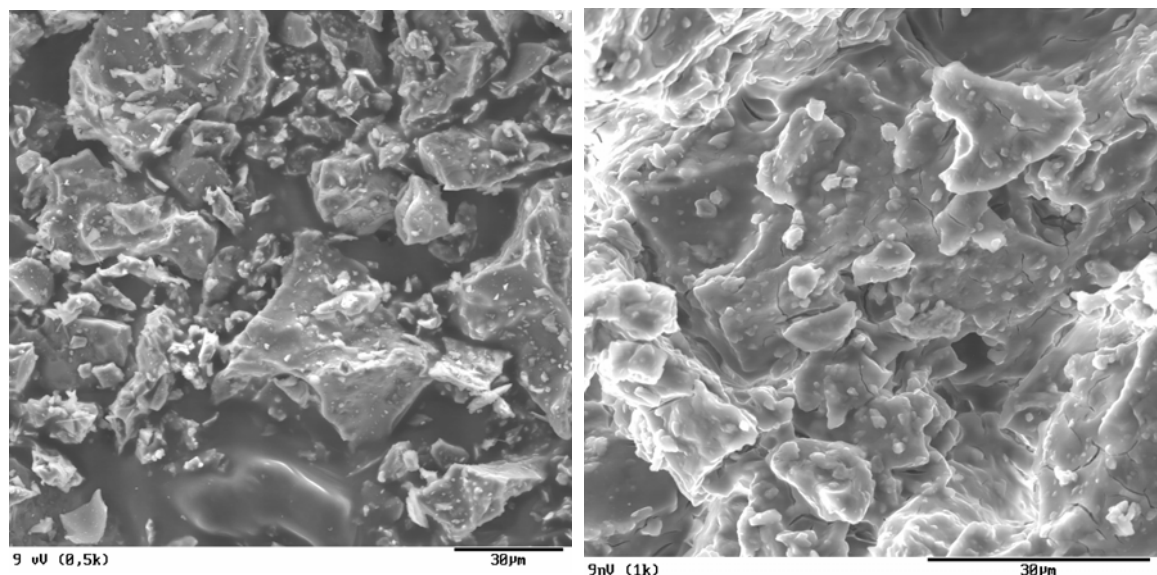


Abbildung 5.5.5: REM-Aufnahme Probe G9 vor und nach dem Quellversuch

bewirkt eine nur geringe Hygroskopizität, durch das fehlende Calcium ist trotzdem eine gewisse Löslichkeit der Glasstruktur vorhanden. In Tabelle 5.5.1 sind die Zusammensetzung der Proben vor und nach dem Quellversuch angegeben. Eine Probe mit sehr hohem Alkalianteil ist in Abbildung 5.5.13 zu sehen. In Probe G12 ist wiederum kein Calcium vorhanden, was die schon vor dem Quellversuch sehr deutlich ausgebildete glasige Struktur erklärt. Es sind keine visuellen Veränderungen an der Probe durch den Quellversuch festzustellen und die Oxidzusammensetzungen liegen vor und nach dem Versuch im Bereich der normalen Schwankungen und zeigen ebenfalls keine Veränderungen.

In Tabelle 5.5.4 werden EDX-Analysen ausgewählter Proben vor und nach dem Quellversuch gegenübergestellt. Auf die jeweiligen Messwerte wurde bei der Diskussion der REM-Aufnahmen eingegangen. In Tabelle 5.5.5 sind die Integralmessungen aller Proben aufgeführt. Alle Proben zeigen Abweichungen von der geplanten Sollzusammensetzung (siehe Abschn. 5.2), wobei die Schwankungen unterschiedlich stark ausfallen. In den meisten Fällen sind die  $K_2O$ -Gehalte etwas zu hoch und die  $Na_2O$ -Gehalte etwas zu niedrig. Die  $CaO$ -



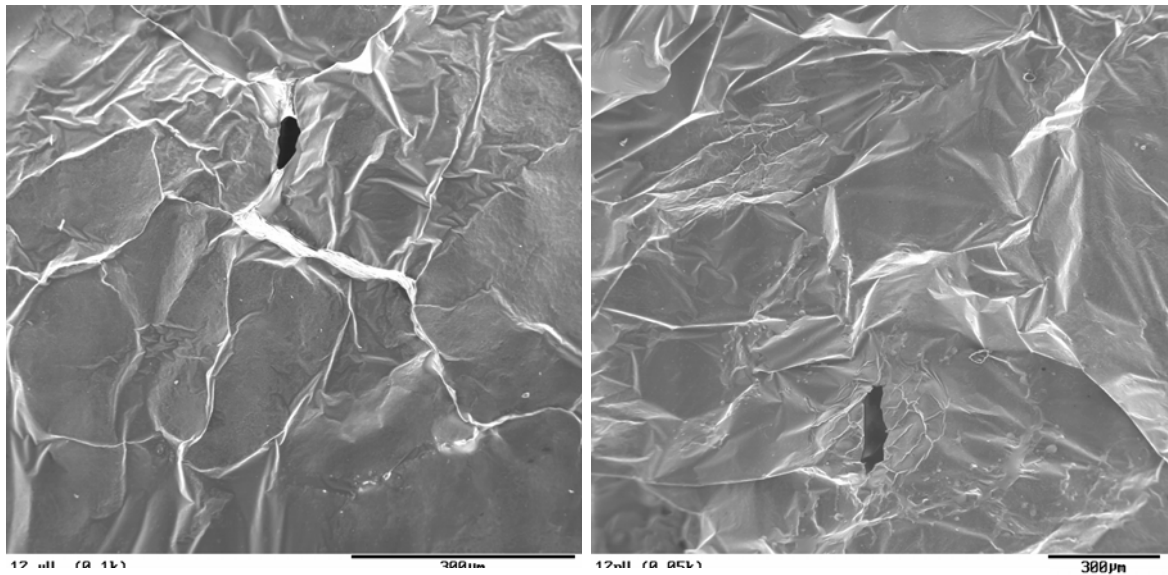


Abbildung 5.5.6: REM-Aufnahme Probe G12 vor und nach dem Quellversuch

Tabelle 5.5.4: EDX-Analysen ausgewählter Proben vor und nach dem Quellversuch

Probenbezeichnung	vor Versuch				nach Versuch			
	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	CaO	SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	CaO	SiO <sub>2</sub>
G1	7,76	40,79	0	51,44	7,72	37,06	0	55,2
G2	10,41	42,92	6,82	39,35	7,55	31,51	12,13	48,8
G3	8,1	43,47	21,25	26,75	13,58	40,18	21,27	24,98
G4	4,56	37,37	44,21	13,61	6,79	38,21	42,41	12,33
G9	2,25	10,49	0	87,26	2,87	12,67	0	83,76
G12	8,21	53,31	0	38,03	5,08	47,97	0	45,99

und SiO<sub>2</sub>-Gehalte liegen relativ nah an den Sollwerten für die Mischungen. Diese Abweichungen lassen sich durch den Herstellungsprozess der Proben und auch durch die verwendete Analysemethode erklären. Das Brennen der Gläser erfolgte in einem Tiegel ohne eine stetige Durchmischung während des Schmelzvorganges. Somit können Inhomogenitäten im entstandenen Glas nicht ausgeschlossen werden. Die EDX-Analyse nutzt bezogen auf das Volumen der Quellprobe nur eine sehr geringe Analysefläche und erzeugt durch diese punktuelle Betrachtung ebenfalls Abweichungen.

Tabelle 5.5.5: EDX-Integralmessungen der Proben G1 bis G20

Probenbezeichnung	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	CaO	SiO <sub>2</sub>
G1	8,14	36,95	0	54,9
G2	8,86	41,49	10,2	39,03
G3	11,88	34,67	21,02	31,3
G4	8,27	24,78	35,61	30,99
G5	6,72	22,92	41,93	28,43
G6	3,42	20,87	0,25	75,14
G7	3,11	20,56	10,76	65,16
G8	3,33	19,38	23,38	53,9
G9	2,25	10,49	0	87,26
G10	1,45	10,59	11,32	76,64
G11	1,7	10,35	22,1	65,86
G12	6,36	48,99	0	43,56
G13	9,07	47,81	5,79	37,33
G14	8,98	55,38	15,74	19,9
G15	14,91	30,66	0	54,43
G16	12,98	30,57	11,66	44,79
G17	25,02	33,9	14,3	26,78
G18	25,86	14,22	0	59,92
G19	25,26	13,77	12,35	48,62
G20	38,08	13,63	17,25	31,04

## DTA

Diese Untersuchung wurde an den nach den Quelldruckversuchen gewonnenen hydratisierten Proben durchgeführt. Da die Proben größtenteils eine glasige Struktur aufweisen aber die Ausgangszusammensetzungen nicht optimal für eine Glasbildung sind, sollten die in der amorphen Struktur eingebetteten Phasen bestimmt werden. Hierbei kann es sich nach den Quellversuchen um Portlandit oder auch Calciumcarbonat handeln. Dazu wurde ein Teil des Probenmaterials in einem kleinen Korundgefäß bis auf 1200 °C erhitzt. Dabei werden sowohl die Masse, als auch die inneren und äußeren Temperaturen gemessen und somit die

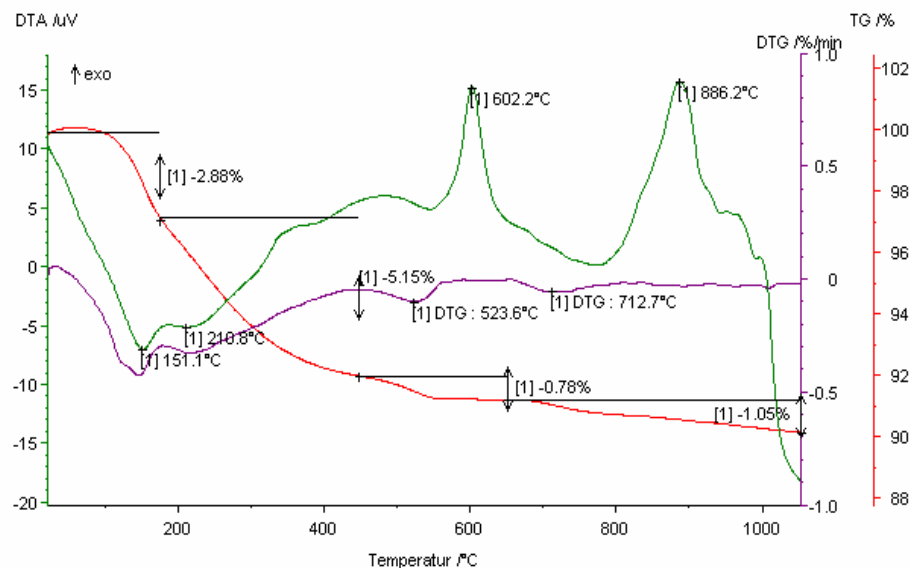


Abbildung 5.5.7: DTA-Kurvenverlauf Probe G1

materialtypischen Stoffumwandlungen festgestellt. Da jede Verbindung typische Kurvenverläufe zeigt, kann anhand früher durchgeführter Untersuchungen an Eichmaterialien auf die Existenz dieser geschlossen werden.

In Abbildung 5.5.7 ist der DTA-Kurvenverlauf der Probe G1 dargestellt. Der endotherme Peak bei ca. 150 °C mit gleichzeitiger starker Masseabnahme wird vermutlich durch das Abgeben

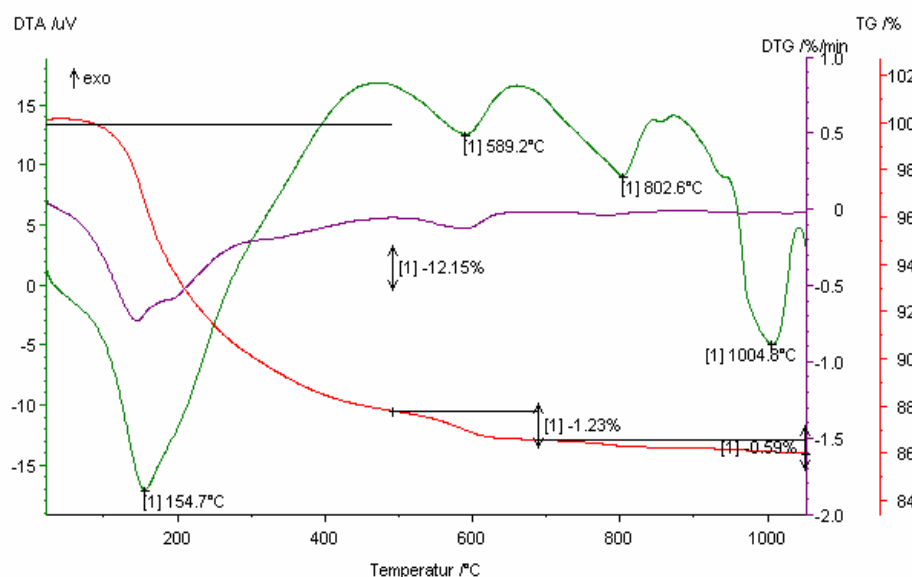


Abbildung 5.5.8: DTA-Kurvenverlauf Probe G2

von oberflächlich angelagerter Feuchtigkeit an der Probe hervorgerufen. Die beiden exothermen Peaks bei 602,2 °C und 886,2 °C, die mit einem leichten Masseverlust einhergehen, können keiner Verbindung zugeordnet werden. Die Probe G2 zeigt in Abbildung 5.5.8 ebenfalls einen starken endothermen Masseverlust von ca. 12 %, der von einer zweiten schwachen Masseabnahme mit ca. 1 % gefolgt wird. Der erste endotherme Peak ist wieder auf eine Abgabe von oberflächlicher Feuchtigkeit zurückzuführen. Zwei weitere endotherme Peaks haben nur einen sehr geringen kontinuierlichen Masseverlust zur Folge. Der Peak bei ca. 800 °C kann eventuell durch eine Zersetzung von Karbonat hervorgerufen werden. In Abbildung 5.5.9 ist der Kurvenverlauf für die Probe G3 aufgezeichnet. Auch hier ist zunächst wieder deutlich eine starke Massenabnahme in Verbindung mit einem endothermen

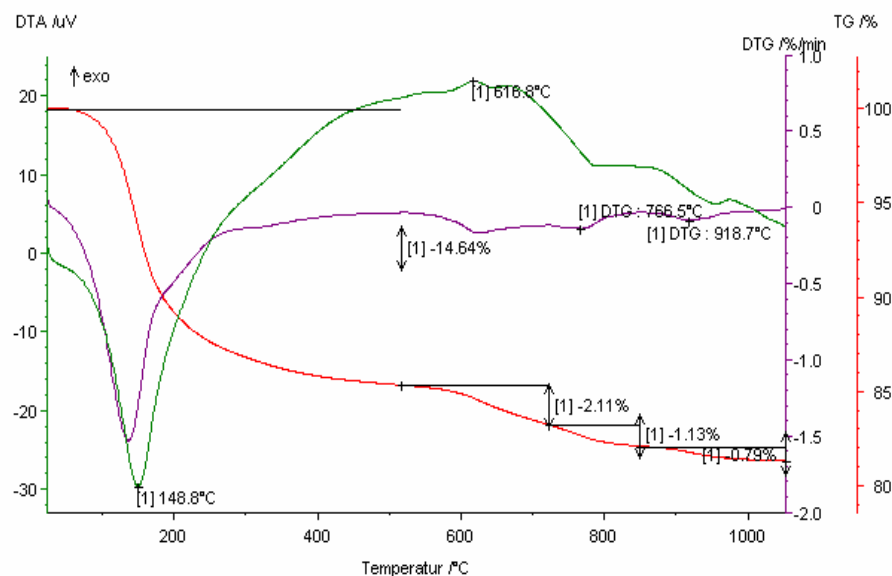


Abbildung 5.5.9: DTA-Kurvenverlauf Probe G3

Peak zu beobachten. Es erfolgt ein exothermer Verlauf der Reaktion mit einem Maximum bei 616,8 °C dem ein Masseverlust von ca. 4 % zugeordnet werden kann.

Die Probe G4 zeigt wie auch die vorhergehenden Proben einen endothermen Masseverlust

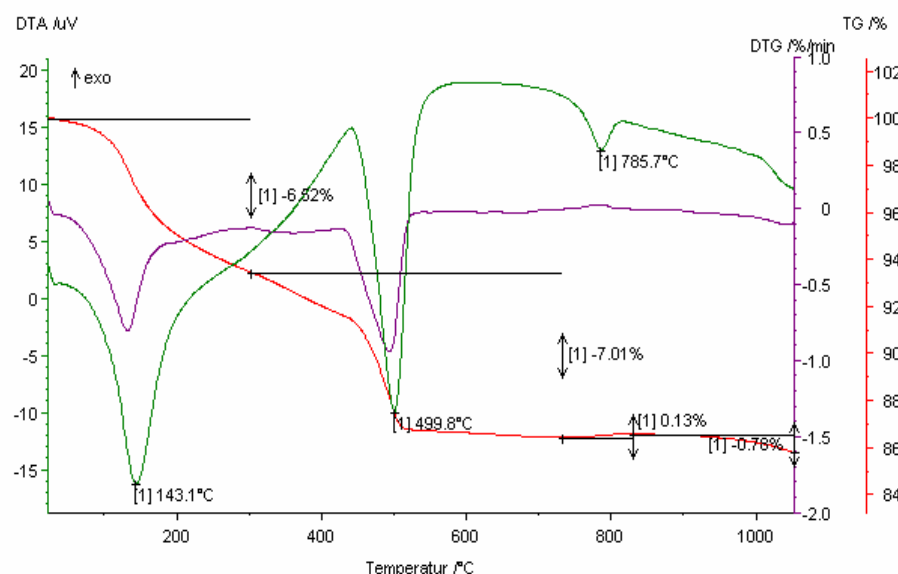


Abbildung 5.5.10: DTA-Kurvenverlauf Probe G4

von ca. 5 % bis zu einer Temperatur von 200 °C. Sie zeigt aber auch einen deutlichen endothermen Peak bei ca. 500 °C mit ca. 5 % Masseverlust, welcher wahrscheinlich Portlandit zugeordnet werden kann. Portlandit wurde auch in der zugehörigen XRD-Analyse festgestellt. Der kleine endotherme Peak bei 785,7 °C könnte wieder auf ein Abspalten von Karbonat zurückzuführen sein.

Die Probe G9 zeigt bei der Untersuchung mittels DTA einen völlig anderen Kurvenverlauf als die restlichen hier vorgestellten Proben (Abb. 5.5.11). Zu Beginn bis ca. 200 °C findet kein endothermer Vorgang statt, sondern die Probe zeigt einen ausgeprägten exothermen Verlauf

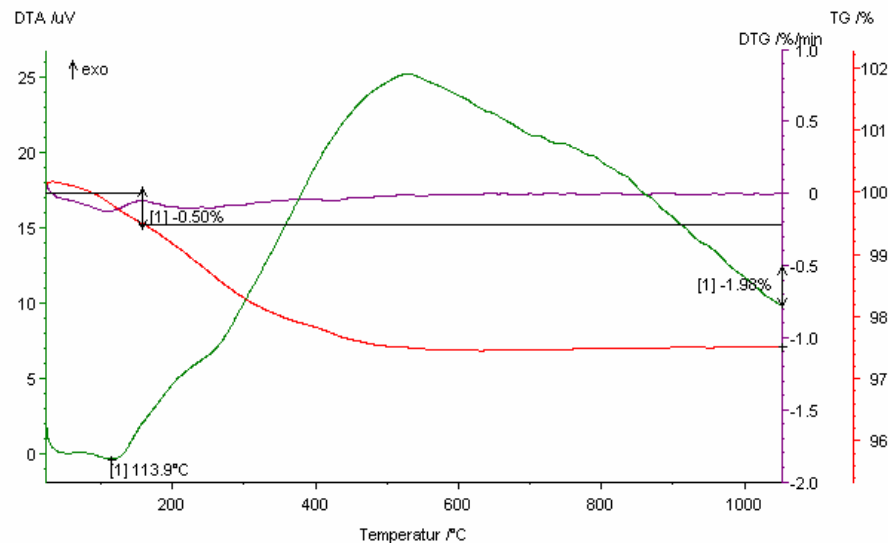


Abb. 5.5.11: DTA-Kurvenverlauf Probe G9

über den kompletten Temperaturbereich. Dieser wird von einem stetigen leichten Masseverlust begleitet, der ab einer Temperatur von ca. 500 °C zu einem konstanten Verlauf übergeht. In dieser Probe sind 88,5 % Mikrosilika enthalten, welches diesen Kurvenverlauf erklärt. Amorphe Kieselsäure rekristallisiert zu Quarz im weiteren Verlauf zu Tridymit (ca. bei 870 °C). Neben diesen beiden SiO<sub>2</sub> Modifikationen weist die XRD-Analyse auch noch Cristobalit als Bestandteil dieser Probe aus. Unter unbeeinflussten Bedingungen entsteht

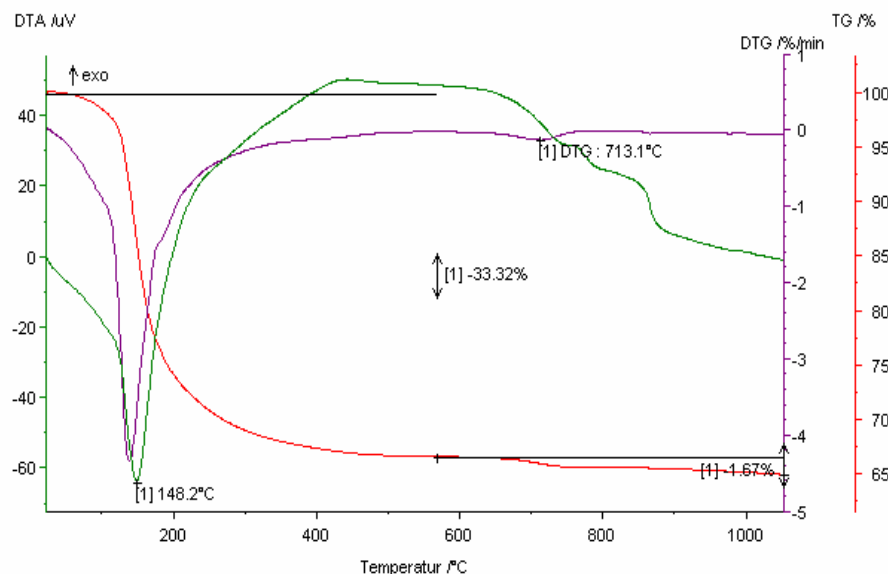


Abbildung 5.5.12: DTA-Kurvenverlauf Probe G12

diese Modifikation erst bei über 1400 °C, bei Anwesenheit von Alkalien jedoch bei deutlich niedrigeren Temperaturen.

In Abbildung 5.5.12 ist der DTA-Kurvenverlauf der Probe G12 zu sehen. Diese Probe zeigt wieder den schon von vorausgegangenen Proben bekannten starken endothermen Peak bei ca. 150 °C. Er ist bei dieser Probe besonders deutlich ausgebildet und wird von einem sehr starken Masseverlust von fast 30 % begleitet. Dieses Verhalten lässt sich mit dem sehr hohen Gehalt an Alkalien erklären, die zu einer starken Hygroskopizität der Probe führen. Da in der Ausgangsmischung kein Calcium enthalten war, kann man bei dieser Probe keinen Portlanditpeak finden. Der weitere exotherme Kurvenverlauf könnte wieder auf die Rekristallisation der enthaltenen Kieselsäure deuten.

### **Löslichkeit der synthetischen Gele**

Da eine starke Löslichkeit eines Gels einem möglichen Quellvermögen entgegenwirkt, sollte die Löslichkeit der Versuchsubstanzen überprüft werden. Nach ersten Vorversuchen wurden an den gebrannten Probematerialien in zwei Versuchsreihen Lösungsversuche unternommen. Der Präparations- und Versuchsablauf ist hier in Stichpunkten kurz erläutert:

- in 25 ml große Proberöhrchen wurden je ca. 1 g wasserfreies synthetisches AKR-Gel und 4 g destilliertes Wasser eingebracht,
- die Röhrchen wurden eine Woche bei Raumtemperatur gelagert und wiederholt geschüttelt,
- anschließend erfolgte ein Zentrifugieren bei 5000 U \* min<sup>-1</sup> für 10 Minuten,
- die überstehende Flüssigkeit wurde abgezogen und chemisch analysiert,
- der noch feuchte Feststoffanteil am Boden der Röhrchen wurde gewogen und anschließend im Trockenschrank bei 40 °C bis zum Erreichen der Massekonstanz getrocknet,
- es folgte die chemische Analyse des getrockneten Feststoffes

Da die Massen der getrockneten Feststoffphasen nach den Lösungsversuchen gerade bei den kalkreichen Proben aufgrund chemisch gebundenen Wassers sogar teilweise über den eingebrachten Probenmassen lagen, wurde zusätzlich ein Ausglühversuch durchgeführt. Der hier zurückgebliebene Feststoff wurde erneut einer Löslichkeitsmessung unterzogen.

Probe G1 löste sich im Löslichkeitsversuch bis auf einen geringen Rest nahezu vollständig auf. Während der Probenvorbereitung für den Ausglühversuch trat bei gleichem Proben zu Wasser - Verhältnis wie im Löslichkeitsversuch eine vollständig Auflösung ein. In der Tabelle 5.5.6 sind die ermittelten Werte angegeben.

Tabelle 5.5.6: ermittelte scheinbare und tatsächliche Löslichkeiten Probe G1

<b>scheinbare Löslichkeit nach Trocknung bei 40°C</b>	<b>[g/l]</b>	<b>248</b>
<b>Löslichkeit nach Probenerhitzung auf 600°C</b>	<b>[g/l]</b>	<b>&gt;250</b>
<b>Löslichkeit nach Probenerhitzung auf 700°C</b>	<b>[g/l]</b>	<b>&gt;250</b>

Die Zusammensetzung der Lösung und der nichtlöslichen Bestandteile für die Probe G1 zeigt die Tabelle 5.5.7



Tabelle 5.5.7: chemisch ermittelte Zusammensetzungen Probe G1

Lösung [mg/l]					Feststoffphase [%]				Summe
Ca	K	Na	Si	pH	CaO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub>	[%]
74,9	67000	11900	70500	13,20	-	-	-	-	-
daraus berechnete Ausgangsmaterialzusammensetzung [%]									Summe
CaO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub>						[%]
0,04%	32,59%	6,48%	60,89%						100,00%

Da sich die Probe bis auf einen geringen Bodensatz vollständig auflöste, konnte eine Feststoffphase nicht mehr analysiert werden. Die Berechnung der chemischen Zusammensetzung stimmt relativ gut mit der mittels EDX ermittelten Zusammensetzung überein.

Probe G2 bildete das klarste Gel überhaupt. Scheinbar ist ein Calciumoxidgehalt von etwa 10 % sehr gut in die Gelstruktur einzubauen, reduziert jedoch gleichzeitig die Löslichkeit des Materials gegenüber reinen Wassergläsern deutlich.

Die Zusammensetzung der Lösung und der nichtlöslichen Bestandteile für die Probe G2 zeigt die Tabelle 5.5.8

Tabelle 5.5.8: ermittelte scheinbare und tatsächliche Löslichkeiten Probe G2

scheinbare Löslichkeit nach Trocknung bei 40°C	[g/l]	35
Löslichkeit nach Probenerhitzung auf 600°C	[g/l]	135,5
Löslichkeit nach Probenerhitzung auf 700°C	[g/l]	135,8

Auch hier bildet die ermittelte Ausgangsmaterialzusammensetzung sehr gut die Sollzusammensetzung ab.

Tabelle 5.5.9: chemisch ermittelte Zusammensetzungen Probe G2

Lösung [mg/l]					Feststoffphase [%]				Summe
Ca	K	Na	Si	pH	CaO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub>	[%]
2140	49600	8130	21500	13,88	10,90	20,39	4,52	35,50	71,31
daraus berechnete Ausgangsmaterialzusammensetzung [%]									Summe
CaO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub>						[%]
10,80%	36,08%	7,33%	45,79%						100,00%

Dass die Löslichkeit mit steigendem Calciumgehalt in den Proben abnimmt, zeigen die ermittelten Werte der Probe G3 (Tab. 5.5.9)

Der ermittelte Calciumgehalt in der Probe liegt zu Lasten der restlichen Bestandteile etwas über dem Sollwert.

Tabelle 5.5.10: ermittelte scheinbare und tatsächliche Löslichkeiten Probe G3

scheinbare Löslichkeit nach Trocknung bei 40°C	[g/l]	15
Löslichkeit nach Probenerhitzung auf 600°C	[g/l]	78,7
Löslichkeit nach Probenerhitzung auf 700°C	[g/l]	80,1

Tabelle 5.5.11: chemisch ermittelte Zusammensetzungen Probe G3

Lösung [mg/l]					Feststoffphase [%]				Summe
Ca	K	Na	Si	pH	CaO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub>	[%]
4,1	41500	7670	801	13,98	26,10	15,65	3,41	31,70	76,86
daraus berechnete Ausgangsmaterialzusammensetzung [%]									Summe
CaO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub>						[%]
27,07%	32,58%	6,92%	33,43%						100,00%

Die Probe G4 mit einem sehr hohen Calciumanteil zeigt auch die niedrigsten Löslichkeiten der hier vorgestellten Untersuchungsergebnisse. Bei der schonenden Trocknung bei 40°C liegt die Masse des gewonnenen Feststoffmaterials sogar über der der eingebrachten Probenmasse. Dies lässt auf gebundenes Wasser in der Probe schließen, das sich bei einer Trocknung bei 40 °C nicht entfernen lässt (Tab. 5.5.12).

Die Zusammensetzung der Lösung und der unlöslichen Bestandteile ist in Tabelle 5.5.13 angegeben.

Tabelle 5.5.12: ermittelte scheinbare und tatsächliche Löslichkeiten Probe G4

scheinbare Löslichkeit nach Trocknung bei 40°C	[g/l]	-24
Löslichkeit nach Probenerhitzung auf 600°C	[g/l]	69,0
Löslichkeit nach Probenerhitzung auf 700°C	[g/l]	73,7

Hier fällt ein deutlich überhöhter Calciumanteil gegenüber der Sollzusammensetzung auf. Eine Erklärung für diesen hohen Gehalt liegt nicht vor.

Tabelle 5.5.13: chemisch ermittelte Zusammensetzungen Probe G4

Lösung [mg/l]					Feststoffphase [%]				Summe
Ca	K	Na	Si	pH	CaO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub>	[%]
43,6	34300	4590	58,2	13,98	39,60	11,54	3,27	16,40	70,81
daraus berechnete Ausgangsmaterialzusammensetzung [%]									Summe
CaO		K <sub>2</sub> O		Na <sub>2</sub> O		SiO <sub>2</sub>		[%]	
48,78%		25,31%		5,69%		20,23%		100,00%	

Die Probe G9 ist ein Vertreter der Gele mit niedrigen Alkaligehalten und enthält kein Calcium. Zu einem Großteil besteht diese Probe aus Kieselsäure.

Die ermittelten Werte in Tabelle 5.5.14 zeigen erwartungsgemäß eine niedrige Löslichkeit dieses kieselsäurereichen Wasserglases. In Tabelle 5.5.15 sind die chemischen Zusammensetzungen der gelösten und nicht gelösten Bestandteile der Probe aufgeführt.

Die Alkaligehalte befinden sich zu Gunsten des Kieselsäuregehaltes etwas unterhalb der angestrebten Sollwerte.

Tabelle 5.5.14: ermittelte scheinbare und tatsächliche Löslichkeiten Probe G9

scheinbare Löslichkeit nach Trocknung bei 40°C	[g/l]	5
Löslichkeit nach Probenerhitzung auf 600°C	[g/l]	47,6
Löslichkeit nach Probenerhitzung auf 700°C	[g/l]	47,7

Die Probe G12 vertritt Alkalikieselsäure-Gele mit sehr hohen Alkaligehalten ohne einen stabilisierenden Calciumanteil. Die ermittelten Löslichkeiten spiegeln diese Zusammensetzung wieder (Tab. 5.5.16)

Tabelle 5.5.15: chemisch ermittelte Zusammensetzungen Probe G9

Lösung [mg/l]					Feststoffphase [%]				Summe
Ca	K	Na	Si	pH	CaO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub>	[%]
3,5	3040	703	4340	11,37	0	3,26	0,48	85	88,74
daraus berechnete Ausgangsmaterialzusammensetzung [%]									Summe
CaO		K <sub>2</sub> O		Na <sub>2</sub> O		SiO <sub>2</sub>		[%]	
0,00%		4,86%		0,87%		94,26%		100,00%	

Tabelle 5.5.16: ermittelte scheinbare und tatsächliche Löslichkeiten Probe G12

scheinbare Löslichkeit nach Trocknung bei 40°C	[g/l]	>250
Löslichkeit nach Probenerhitzung auf 600°C	[g/l]	>250
Löslichkeit nach Probenerhitzung auf 700°C	[g/l]	>250

Tabelle 5.5.17: chemisch ermittelte Zusammensetzungen Probe G12

Lösung [mg/l]					Feststoffphase [%]				Summe
Ca	K	Na	Si	pH	CaO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub>	[%]
445	80900	8130	53200	13,51	-	-	-	-	-

daraus berechnete Ausgangsmaterialzusammensetzung [%]				Summe
CaO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub>	[%]
0,28%	43,74%	4,92%	51,07%	100,00%

Die Zusammensetzung der Lösung (Tab. 5.5.17) zeigt einen etwas zu niedrigen Natriumgehalt und einen dadurch leicht erhöhten SiO<sub>2</sub>-Gehalt in der Probe.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Proben auch bei der Untersuchung der Löslichkeit und gleichzeitiger Analyse der gelösten Bestandteile Abweichungen von der Sollzusammensetzung aufweisen. Betrachtet man die ermittelten Löslichkeiten und vergleicht diese mit dem Quellverhalten der untersuchten Proben, so kann den Anfangs vermuteten Zusammenhang feststellen. Proben mit einer hohen Löslichkeit zeigen keine nennenswerten Quelleigenschaften, Proben mit einer geringeren Löslichkeit können einen Quelldruck aufbauen.

## Zusammenfassung

Es ist mit der vorgestellten Messeinrichtung möglich, das Quellmaß und die Quellkraft von synthetischen Alkalisilikaten zu bestimmen. Die in diesem Abschnitt behandelten Proben geben repräsentativ das Spektrum aller in dieser Arbeit untersuchten Proben wieder.

Sowohl die gemessenen Quellmaße als auch die ermittelten Quelldrücke lassen Rückschlüsse auf den Einfluss der Zusammensetzung auf die Eigenschaften der Gele zu. Es wurden Versuche mit synthetischen Gelen, handelsüblichen Wassergläsern und dem natürlichen Vorbild folgend Lösungsversuche mit verschiedenen Kieselsäurelieferanten durchgeführt. Die aussagekräftigsten Ergebnisse werden bei den Versuchen mit künstlich hergestellten Gelen erreicht. Hierbei erzeugen hohe Alkaligehalte bei einer niedrigen Viskosität und Löslichkeit (durch geringe Mengen Calcium in der Probe hervorgerufen) hohe Quelldrücke. Der Einfluss des Calciums im Gel zeichnet sich deutlich ab, ohne Calcium bauen die Proben keine Quelldrücke auf, bei zu hohen Calciumgehalten entstehen nicht quellfähige Alkali-Calcium-Silikat-Hydrate. Dieser Effekt erklärt auch die Wirkung von CEM III-Zementen oder den Silika- und Flugascheeinsatz. In diesen Systemen wird der Portlanditgehalt so stark gesenkt, dass kein Calcium für den Einbau in den Gelen zur Verfügung steht. Somit können keine quellfähigen Gele gebildet werden. Vergleichende Untersuchungen am FIB zum Portlanditgehalt von CEM I = 22,3 %, CEM III = 2,4 % und CEM III + 20 % FA = 1,6 % zeigen deutlich das stark sinkende Calciumangebot. Diese Gehalte wurden durch eine quantitative Röntgenphasenanalyse nach dem Rietveld-Verfahren in den Bindemittelproben bestimmt. Amorphe Anteile wurden durch Zugabe eines internen Standards (20 % ZnO) ermittelt. Ein Einfluss des Natrium-Kalium-Verhältnisses auf das Quellverhalten ist nicht zu erkennen. Trotz eines geeigneten Porenraumes im „saugenden Stein“ lösen sich die Proben aus synthetischen Gelen (G1 bis G33) ohne Calciumanteile (Wassergläser) in der Quellform auf und erzeugen keinen Quelldruck, das bedeutet, eine Osmose wie in [13] findet bei den hier untersuchten Quellvorgängen nicht statt. Es handelt sich bei den hier gemessenen Quelldrücken um Drücke, die durch eine Wasseraufnahme der Proben erzeugt wurden. Die Wirkung von AKR-vermeidenden Zusätzen (FA, Silika usw. siehe Abschn. 3.1) kann mit diesen Messungen bestätigt werden, neben den Einfluss auf den Calciumgehalt der Gele wird das Alkali-Silika-Verhältnis in den Proben stark Richtung Kieselsäure verschoben und so kommt es zu keinen Quellerscheinungen. Handelsübliche Wassergläser sind durch ihre vorgegebene Zusammensetzung nur bedingt für Quellmessungen nutzbar, da sie kein Calcium enthalten. Nach diesen Untersuchungsergebnissen können prinzipiell Ca-freie Wassergläser aufgrund ihrer hohen Löslichkeit kein quellfähiges Gel bilden, eine Aussage zur Ausbildung einer Schichtstruktur als Grundlage für eine Quellfähigkeit kann mit den vorliegenden Ergebnissen nicht getroffen werden. Alle hier vorgestellten Analysemethoden sind nur begrenzt geeignet um die Zusammensetzung und vor allem die Struktur eines Glases bzw. eines AK-Gels zu beschreiben. Die untersuchten Gläser sind, bedingt durch ihre Herstellung, inhomogen, somit kann mittels REM EDX keine oder nur schwer eine integrale Aussage über die stoffliche Zusammensetzung der Proben gegeben werden. Die vorgefundenen Abweichungen von den Sollzusammensetzungen sind sicher auch mit diesem Umstand zu begründen. In der XRD zeigen alle Proben auf Grund ihrer glasigen Struktur nur wenige Reflexe und einen stark erhöhten Untergrund. Deshalb lassen sich nur an wenigen

Proben Röntgenpeaks bekannter Mineralien zuordnen. Bei diesen Proben mit kristallinen Phasen werden deren Anteile von der Gesamtzusammensetzung abgezogen, so dass die amorphen, eventuell quellfähigen Bestandteile der Probe betrachtet werden können. Mit steigendem Calcium-Gehalt verstärken sich die Reflexe der Proben und es können hier Ca-Verbindungen gefunden werden. Auch bei den Proben mit einem höheren Kieselsäureanteil können Reflexe von verschiedenen Modifikationen des  $\text{SiO}_2$  nachgewiesen werden. Wenn Proben eine erfassbare kristalline Struktur hatten, konnte nach den Quellversuchen ein Abbau der kristallinen Phasen beobachtet werden.

Beim visuellen Vergleich der Proben vor und nach den Quellversuchen im REM kann nach den Versuchen eine Strukturveränderung hin zu einem glasigeren Gefüge festgestellt werden. Bei höheren Calciumgehalten bilden sich weniger amorphe Strukturen aus als bei Proben ohne Calcium. Diese Beobachtungen zeigen, dass sich ein quellfähiges Gel im REM mit einer porösen Struktur darstellt, hingegen ein nicht quellfähiges eine glasige, dichte Struktur aufweist. Eine Erklärung für diese Strukturunterschiede liegt im Wassergehalt der Proben vor der Probenaufbereitung für das REM. Die glasig, dichten Strukturen enthalten kein Wasser, die porösen geben das enthaltene Wasser bei der Aufbereitung ab. Die Auswertung der EDX-Analysen zeigt eine systematische Überhöhung der Kaliumanteile und einen dafür geringeren Natriumanteil in den Proben, prinzipiell spiegelt sie aber die Sollzusammensetzung der Proben wieder. Nach Quellversuchsende konnte im Allgemeinen eine der Sollzusammensetzung nähere Probenzusammensetzung nachgewiesen werden.

In der DTA reagieren alle Proben mit einem Masseverlust unter zunächst endothermen und später exothermen Vorgängen. Die endotherme Reaktion zu Beginn der Messung deutet auf oberflächlich gebundene Feuchtigkeit der Proben hin. Die Intensität der Peaks und die Höhe der Masseabnahme korrelieren mit den enthaltenen Alkalimengen in den Proben. Die zugeordneten Verbindungen konnten teilweise auch in den XRD-Analysen nachgewiesen werden. Proben mit einem hohen  $\text{SiO}_2$ -Gehalt zeigen auch ähnliche Kurvenverläufe wie eine reine Kieselsäure. Es wird deutlich, dass durch die festgesetzte Probenzusammensetzung keine reinen Gläser entstanden sind, sondern mehrere Phasen nebeneinander vorliegen. Da nur bei bestimmten Verhältnissen von Netzwerkbildner zu Netzwerkwandler reine Glasphasen entstehen können, ist diese Beobachtung mit den vorab gewählten Zusammensetzungen zu erklären.

Die ermittelten Löslichkeiten decken sich mit dem beobachteten Verhalten der Proben während der Quellversuche. Mit einem steigenden Calcium- und/oder Siliciumanteil sinkt die Löslichkeit der Gläser. Reine Wassergläser zeigen erwartungsgemäß sehr hohe Löslichkeiten. Die aus den Lösungen und dem restlichen Feststoff errechneten Zusammensetzungen weichen teilweise von den Sollwerten ab.

Mit den hier vorgestellten Ergebnissen und den durchgeführten Untersuchungen kann eine Abhängigkeit des Quellverhaltens der Alkali-Kieselsäure-Gele vom Calciumgehalt und dem Alkali-Kieselsäure-Verhältnis nachgewiesen werden. Eine Aussage zu einer eventuell notwendigen Schichtstruktur der Gele für eine Quellfähigkeit ist mit den in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnissen nicht möglich und erfordert weiterführende Untersuchungen zu dieser Problemstellung.



## 6 Bestimmung ausgewählter Materialparameter von Gesteinskörnungen und Mörtelmatrix

Da bisher nur wenige Untersuchungen zu Quelleigenschaften von Alkalisilikat-Gelen durchgeführt wurden, sind auch nur relativ wenige Quelldruckmessungen bekannt. Um den benötigten Quelldruck für die Zerstörung eines Gesteinskorns oder einer Betonmatrix näher beschreiben zu können, sollen in den folgenden zwei Abschnitten Ergebnisse von ergänzend entwickelten Prüfmethoden vorgestellt werden.

### 6.1 Zugfestigkeit von Gesteinskörnungen

Fast immer lassen sich in Dünnschliffen von AKR geschädigten Betonen gerissene oder aufgebrochene Gesteinskörner nachweisen. Es ist also davon auszugehen, dass deren Zugfestigkeit überschritten wurde. Um die Größenordnung dieser Kräfte abzuschätzen, ist die Zugfestigkeit einzelner Gesteinskörner von Interesse.

Die Suche nach bereits normierten Verfahren zur direkten Zugfestigkeitsbestimmung von Betonzuschlag oder Naturstein bleibt in der deutschen Normung ohne Erfolg. In den USA existiert eine Vorschrift zur Prüfung der „Zugfestigkeit ungestörter Proben aus Felsgestein“ (ASTM D 2936). [78] Nach dieser Norm werden direkte Zugprüfungen an Zylindern (Durchmesser mind. 48 mm, Höhe/Durchmesser = 2,0...2,5) durchgeführt. Die hier vorgestellte Zugfestigkeitsbestimmung lehnt sich weitestgehend an diese Norm an.

#### **Probenauswahl**

Von folgenden Gesteinen aus ausgewählten Vorkommen wurde die Zugfestigkeit ermittelt, die Ergebnisse gelten nicht pauschal für die Gesteinsart:

- |                         |                   |
|-------------------------|-------------------|
| 1. Grauwacke            | 6. Granit         |
| 2. Porphyr              | 7. Granulit       |
| 3. Porphyr(angewittert) | 8. Kieselschiefer |
| 4. Flint                | 9. Quarz          |
| 5. Diabas               | 10. Kieselkalk    |

#### **Zugfestigkeitsbestimmung und Ergebnisse**

Da die in der ASTM genannten Probekörperabmessungen bei der Zugfestigkeitsbestimmung von Gesteinskörnern für die Betonherstellung nicht realisierbar sind, werden Prismen mit Länge/Breite/Höhe = 15/15/30 mm gewählt. An Grund- und Deckfläche des Probekörpers wird je ein Metallstempel mit Epoxydharz angeklebt. An den Stempeln befinden sich Ösen zum Einhängen in eine Kette, welche die Zugkraft überträgt. Diese Prüfmethode wurde von Mulenga erfolgreich angewandt [48]. Die Krafteinleitung erfolgt langsam und stetig. Der Bruch sollte zwischen 40 und 120 sec nach Belastungsbeginn erfolgen.



Abb. 6.1.1: Probe mit Stempeln

Bei einem Riss durch die Klebefuge wird der Wert mit vorweg gestelltem '>' (größer als) Zeichen markiert. Der Mittelwert aus 10 Messwerten ist dann als Mindestwert der Zugfestigkeit dieses Gesteins zu verstehen.

Tabelle 6.1.1: Übersicht Ergebnisse Zugfestigkeit der Gesteinskörnungen

Gesteinsart	Rohdichte [kg/dm <sup>3</sup> ]	Zugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]
Grauwacke	≈2,64	>13,1
Porphy	≈2,24	6,0
Porphy(angewittert)	≈2,11	4,3
Flint	≈2,66	>22,0
Diabas	≈2,49	11,1
Granit	≈2,50	13,1
Granulit	≈2,52	16,7
Kieselschiefer	≈2,50	1,2
Quarz	≈2,57	7,9
Kieselkalk	≈2,60	5,6

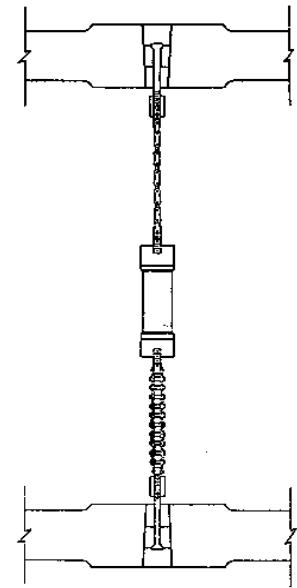


Abbildung 6.1.2: Schematische Darstellung der Zugprüfeinrichtung

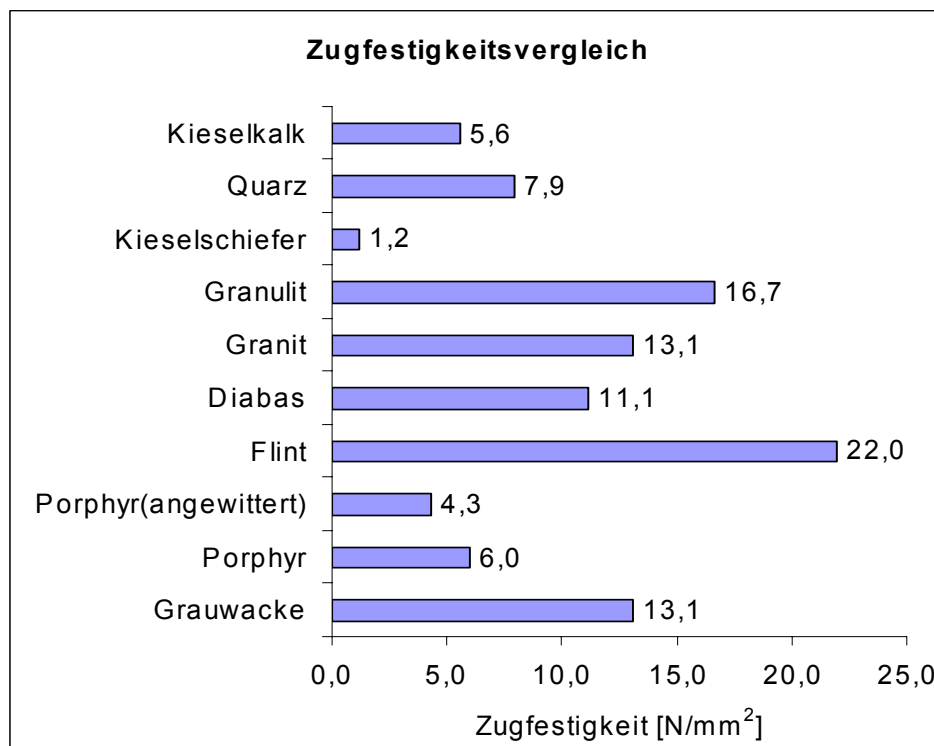


Abbildung 6.1.3: Vergleich der Zugfestigkeiten der untersuchten Gesteinskörnungen

In Abbildung 6.1.1 ist ein Probekörper mit den zugehörigen Stempeln zu sehen und in Abbildung 6.1.2 eine schematische Darstellung der Prüfvorrichtung. Da durch die Probekörperaufbereitung eine eventuell vorhandene Textur oder ein Mikrogefüge nicht berücksichtigt werden konnten, wurden von jedem Gestein 10 Proben untersucht. In Tabelle 6.1.1 wird eine Übersicht über die erhaltenen Messwerte gegeben und in Abbildung 6.1.3 sind die Ergebnisse graphisch dargestellt.

Abgesehen vom Kieselschiefer und dem angewitterten Porphy ist das Niveau der ermittelten Zugfestigkeiten recht hoch. Wie zu erwarten war, zeigen die Gesteine mit dichterem Gefüge höhere Zugfestigkeiten.

## 6.2 Bestimmung des erforderlichen inneren Druckes für die Erzeugung von Rissen im Betongefüge

Ziel dieser Untersuchung war es, eine einfache Methode zu entwickeln, welche geeignet ist, die notwendigen gefügezerstörenden (Gel-)Drücke annäherungsweise zu bestimmen. Durch diese Untersuchungen und Berechnungen sollen lediglich die Größenordnungen der Drücke erkannt und eingeschätzt werden.

In den nachfolgenden Punkten wird zum einen der Ansatz für die Entwicklung eines solchen Versuchsaufbaus näher erläutert – hierfür erfolgte u.a. eine Begutachtung von zahlreichen Dünnschliffen AKR-geschädigter Gesteine (eingebettet in die Zementstein- bzw. Mörtelmatrix) unter Berücksichtigung der Modelle und Theorien zur Gel- und Expansionsdruckentstehung. Zum anderen wird der gewählte Versuchsaufbau auch im Hinblick auf die mathematische Bestimmung des Geldruckes sowie möglicher verursachter Spannungen erläutert.

Über 300 Dünnschliffaufnahmen von Zuschlägen in AKR-geschädigten Betonen, welche am FIB Weimar bereits ausführlich hinsichtlich ihres Rissverhaltens untersucht wurden (siehe [21]), dienten als Anhaltspunkt für die Entwicklung des Versuchsaufbaus. [9]

Wie auch die folgenden ausgewählten Abbildungen verschiedener reaktiver Gesteinsarten beispielhaft zeigen, konnten dabei oftmals Mikrostrukturmerkmale, wie Feinschichtungen, Schieferungen, Mikroluftsysteme und Subkorn Grenzen als Ursache für die Rissentstehung im Korn ausgemacht werden (nach [19] war das in rd. 73 % der Fälle möglich).

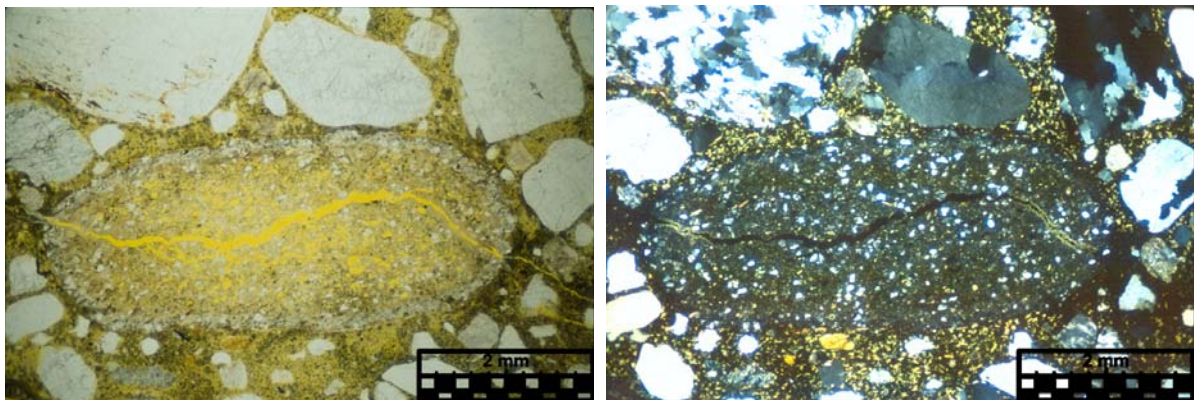


Abbildung 6.2.1: Flint mit deutlichem Riss, welcher sich in die Matrix fortsetzt (links: parallele Polarisatoren / rechts: gekreuzte Polarisatoren)

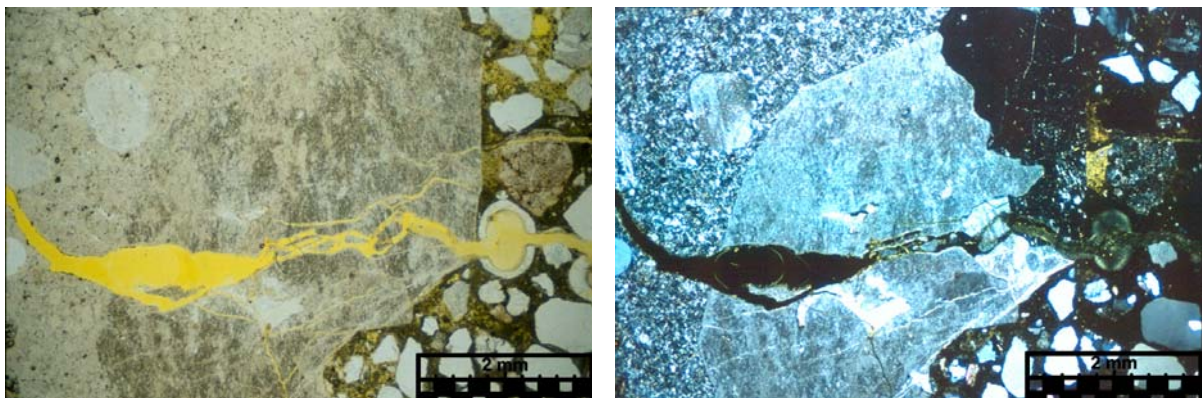


Abbildung 6.2.2: entlang von Mikroklüften gerissener Quarzporphyr mit Rissfortsetzung durch eine Luftpore hindurch in die Matrix (links: parallele Polarisatoren / rechts: gekreuzte Polarisatoren)



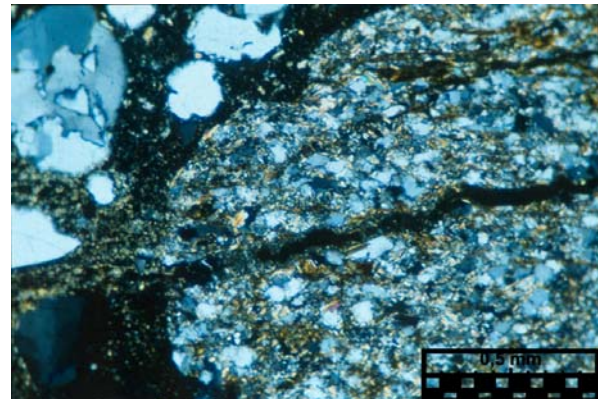
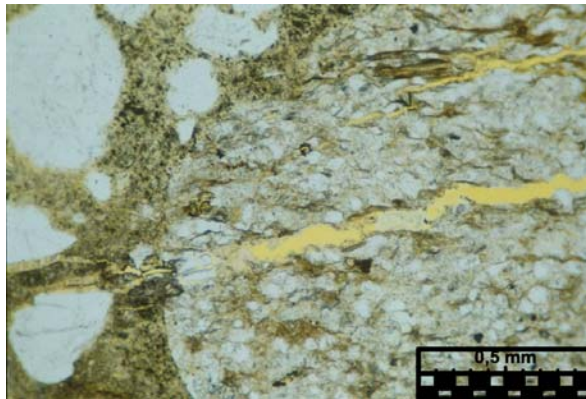


Abbildung 6.2.3: gerissene Grauwacke; Rissverlauf der Glimmerlagerung bzw. Feinschichtung folgend (links: parallele Polarisatoren / rechts: gekreuzte Polarisatoren)

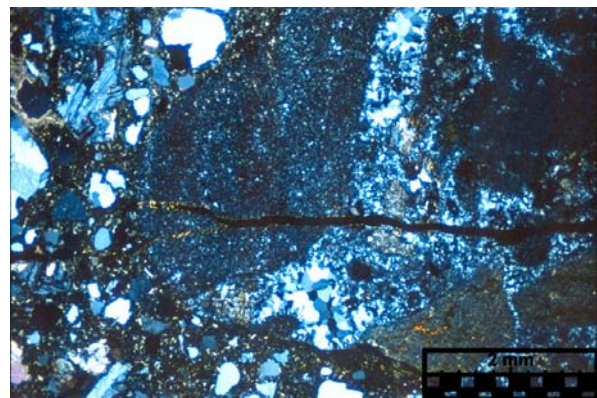
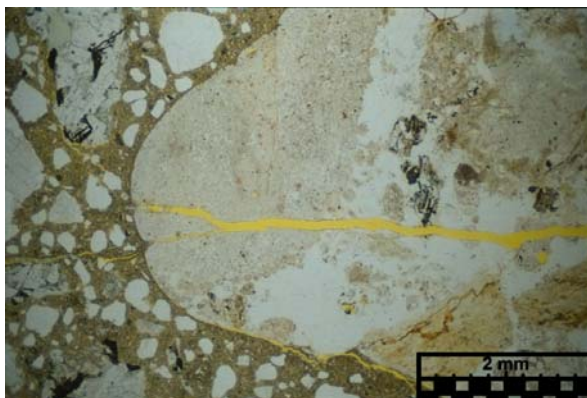


Abbildung 6.2.4: Kieselschiefer mit Gel-gefülltem Riss, welcher sich in die Matrix fortsetzt; der Rissverlauf ist in diesem Fall unabhängig von Schieferung u. Quarzbändern (links: parallele Polarisatoren / rechts: gekreuzte Polarisatoren)

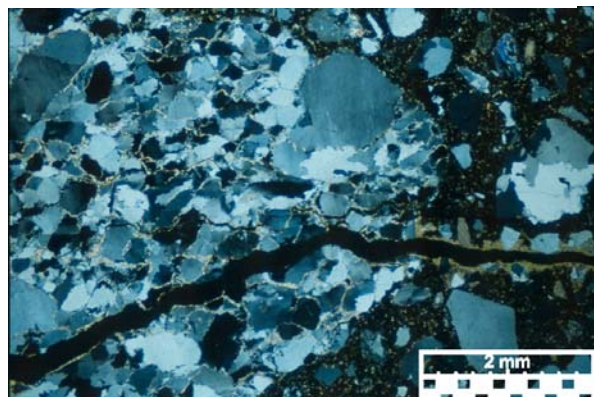
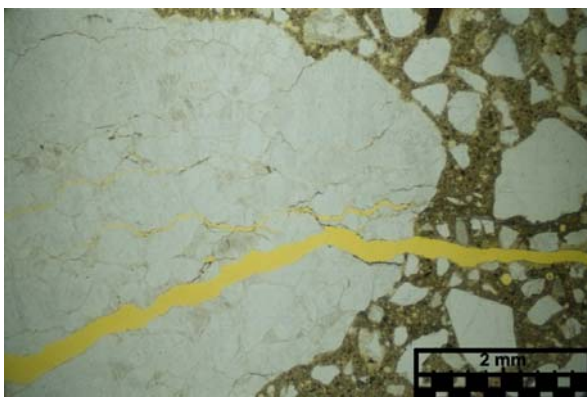


Abbildung 6.2.5: Quarzit mit Gel-gefülltem Riss, welcher Mikrokluftén folgt und sich in die Mörtelmatrix fortsetzt (links: parallele Polarisatoren, rechts: gekreuzte Polarisatoren)

In Anlehnung an das Schadensmodell von SPRUNG und SYLLA (siehe Abschn. 3.1) kann auch anhand dieser untersuchten Aufnahmen davon ausgegangen werden, dass es nach dem Eindringen alkalischer Porenlösung in das  $\text{SiO}_2$  – haltige Gesteinskorn zur AKR und damit einer Gelbildung (niedrigviskos) bevorzugt in den jeweils vorhandenen mikrostrukturellen Störstellen kommt. Bei ausreichender Feuchte dehnt sich das AK-Gel aus, baut damit allmählich einen Druck auf und führt im Moment des Erreichens der Gesteinszugfestigkeit zu einem plötzlichen Aufplatzen des Korns, wobei die Widerstandsfähigkeit der umgebenden Mörtelmatrix in tangentialer Richtung wahrscheinlich darüber entscheidet, ob und wie weit sich der Riss im Beton fortsetzt. Mit anderen Worten bedeutet

dies, dass ein Gel im Fall einer Rissfortsetzung in der Lage sein muss, derartig hohe Expansionsdrücke aufzubauen, dass auch die angrenzende Mörtel- bzw. Zementsteinmatrix zusätzlich zu dem Gesteinskorn eine Rissbildung zeigt.

Diese Überlegungen stellten den Modellansatz für den Entwurf einer Versuchsanordnung zur (Gel-)Druckbestimmung dar, obwohl nicht immer mit einer Rissfortsetzung in die Matrix zu rechnen ist und insbesondere beim porösen Opalsandstein und porösem Flint mit einer Dichte  $< 2,6 \text{ g/cm}^3$  der Effekt des Aufplatzens durch hinreichend vorhandenen Porenraum für entstandenes Gel nur in Ausnahmefällen auftritt. Hauptziel war, die maximal notwendigen Größenordnungen entstehender Drücke beim Versagen von Gesteinskorn und Matrix zu bestimmen.

### ***Versuchsaufbau und -durchführung***

Nach mehreren fehlgeschlagenen Vorversuchen mit einer im Beton eingebetteten sich gleichförmig ausdehnenden Gummiblase wurde zur Simulation des Geldrucks eine rein mechanische Methode angewandt. Grundgedanke war hier, das in sehr vielen Fällen infolge eines entscheidenden Risses aufplatzende Gesteinskorn (siehe Abb. 6.2.1 bis 6.2.5) vereinfachend durch zwei halbkreisförmige Stahlstäbe (Abb. 6.2.6) zu simulieren und die Kräfte zu bestimmen, welche notwendig sind, um die in Mörtel eingebetteten Stäbe bis zur Rissbildung im Gefüge auseinander zu treiben (Abb. 6.2.10 rechts). Hierfür diente ein Metallkeil, welcher durch in die Rundstahlhälften unter gleichem Winkel ( $1,4^\circ$ ) keilförmig eingefrästen Schneisen (Abb. 6.2.7) eine Spaltwirkung erzielte, die über die gesamte Länge konstant war (d.h. die entstehende Fuge hatte auf ganzer Länge die gleiche Breite). Die Belastung erfolgte somit nun einachsig und nicht mehr radial, was auch den wirklich ablaufenden Vorgängen im Gesteinskorn nahe kommt.

Für die Herstellung der Probestkörper wurde die in Abb. 6.2.8 dargestellte Schalung entwickelt. Die Mörtelzylinder unterschiedlichen Durchmessers, welche aus den Mischungen **MII**, **MIII** bzw. **MIV** (Anhang A 1-2, A 1-3, A 1-4) hergestellt wurden, konnten nach einer Nachbehandlung von 5 Tagen durch diese Art des Versuchsaufbaus nun mit einer konstanten Belastungsgeschwindigkeit geprüft werden. Hierfür wurden sie in eine Universalprüfmaschine der Firma TIRA („TIRA test 28100“) eingesetzt (Abb. 6.2.9) und der Keil, auf den zur Reibungsverminderung ein Silikonöl aufgetragen wurde, mit 10 N/s über eine gelenkig gelagerte Stahlplatte kontinuierlich in die Rundstahlhälften bis zum Bruch der Matrix eingepresst (Abb. 6.2.10). Die angeschlossene Kraftmessdose übermittelte die Kraftwerte an den Computer, außerdem wurden der Traversenweg der Prüfmaschine und die Versuchszeit mit dokumentiert.



Abbildung 6.2.6: zwei aneinander fügbare Rundstahlhälften, die sich durch das Einpressen eines Keils gleichmäßig auseinander bewegen (Länge = 125mm)



Abbildung 6.2.7: keilförmig eingefräste Schneisen in den Rundstahlhälften (Winkel:  $1,4^\circ$ )



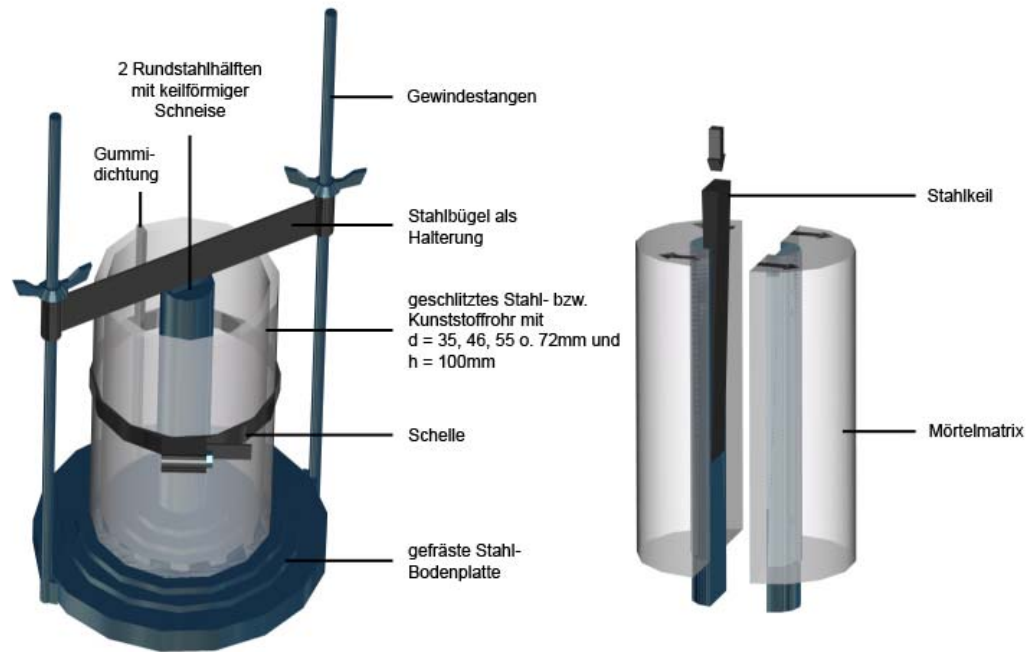


Abbildung 6.2.8: Schalung für Probekörperherstellung



Abbildung 6.2.9: Einpressen des Stahlkeiles in den Mörtelprüfkörper mit Universalprüfmaschine

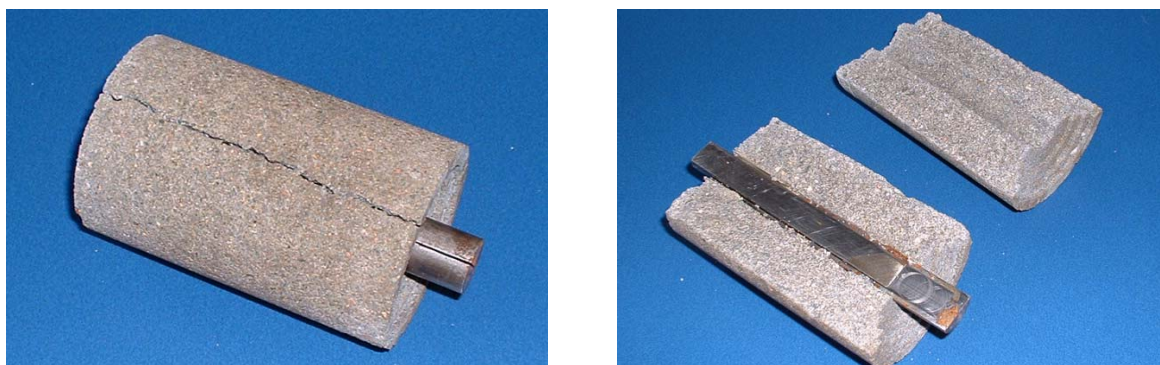


Abbildung 6.2.10: durch Eintreiben des Keiles längs gerissener Prüfkörper

### mathematische Ansätze zur Geldruckberechnung

Während sich bei diesem Versuchsaufbau der Geldruck ohne größere Vereinfachungen unmittelbar aus der auf den Keil aufgetragenen gefügezerstörenden Druckkraft berechnen ließe, war eine Spannungsbestimmung im Rissansatzpunkt nur noch näherungsweise möglich. Grund hierfür ist die Abweichung von einer rotationssymmetrischen Belastung und damit auch rotationssymmetrischen Spannungszuständen, was die analytische Lösung nahezu unmöglich macht. Um jedoch eine Abschätzung der auftretenden Spannungen vornehmen zu können, wurde das „Augenstab-Modell“ von STRAUCH [70] verwendet.

### Geldruck im Moment des Bruches

Grundgedanke bei der Bestimmung des simulierten Geldruckes war es als grobe Näherung, die auf den Keil vertikal eingebrachte Kraft  $F$  über Winkelbeziehungen in eine Horizontalkraft  $F_H$  umzurechnen und diese dann auf die vom Mörtel umgebenen Mantelflächen (bzw. deren Projektionen) gleichmäßig aufzuteilen (Abb. 6.2.11). Die Kraft, bezogen auf die drückende Fläche, konnte dann bei Annahme eines völlig steifen Materialverhaltens der Rundstahlhälften prinzipiell gleichgesetzt werden mit dem notwendigen gefügezerstörenden „Geldruck“  $P_{Gel}$  im Spalt (Gl. 5, Abb. 6.2.12).

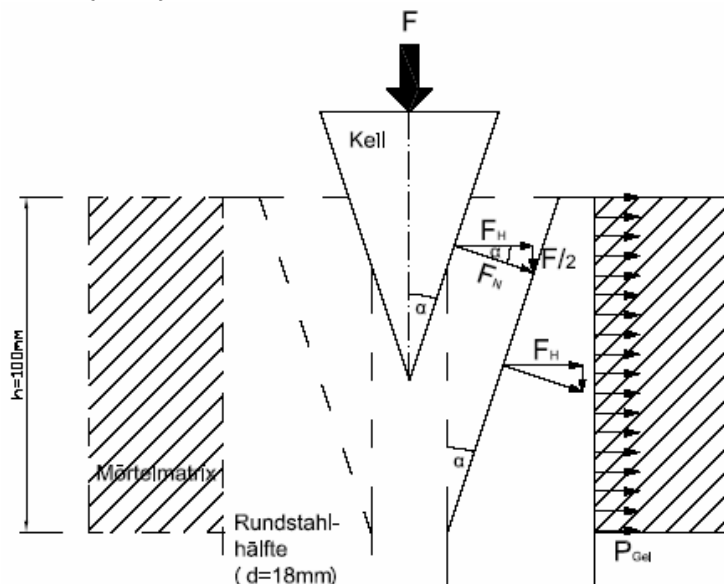


Abbildung 6.2.11: Umrechnung der eingebrachten Kraft  $F$  in einen „Geldruck“

Mit der Umrechnung der gemessenen Kraft  $F$  in die pro Seite wirkende Horizontalkomponente  $F_H$  nach der Gleichung:

$$\{Gl. 4\} \quad F_H = \frac{F}{2 * \tan \alpha} \quad [N]$$

und einer gleichmäßigen Aufteilung auf die Projektion der Mantelfläche nach der Formel:

$$P_{Gel} = \frac{F_H}{h * d} \quad [N/mm^2]$$

$F$  = gemessene gefügezerstörende Maximalkraft

$F_N$  = Flankenkraft des Keils

$F_H$  = Horizontalkomponente von  $F_N$

$P_{Gel}$  = „Geldruck“, welcher sich durch die Aufteilung von  $F_H$  auf die Mantelfläche ergibt

$\alpha$  = Winkel der geneigten Ebenen (hier:  $\alpha = 1,4^\circ$ )

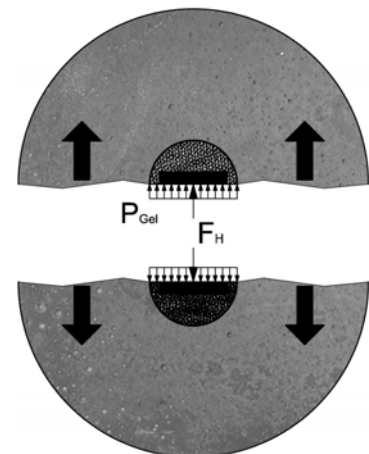


Abbildung 6.2.12: Spaltwirkung des aus der Horizontalkomponente  $F_H$  berechneten Geldruckes  $P_{Gel}$

ergab sich bei bekannter Höhe  $h=100\text{mm}$  und Breite  $d=18\text{mm}$  des simulierten Gesteinskorns der „Geldruck“  $P_{Gel}$  wie folgt:

{Gl. 5} 
$$P_{Gel} = \frac{F}{2 * \tan(1,4^\circ) * 1800} \quad [\text{N/mm}^2]$$

Die so berechneten gefügezerstörenden „Geldrücke“ werden in Abhängigkeit der verschiedenen Mörtelzusammensetzungen und Prüfkörperdurchmesser im nächsten Abschnitt dargestellt. Inwieweit diese Rechenwerte auf die realen Vorgänge übertragbar sind, soll in einem späteren Abschnitt diskutiert werden.

### **Mörtelkennwerte und gefügezerstörender innerer Druck**

Für einen Festigkeitsanstieg der Mörtel von **MII** nach **MIV** wurden bei Verwendung des gleichen Sandes (Starkenbergs 0/2 mm) der Zementgehalt erhöht und gleichzeitig der Wasserzementwert verringert. Zusätzlich tauschte man den für die Mischungen **MII** und **MIII** verwendeten Zement CEM I 32,5 R bei **MIV** durch einen Fertigteilzement CEM I 52,5 R -ft- mit höherer Festigkeitsentwicklung aus. Außerdem wurde bei der letzten Mischung die Sieblinie

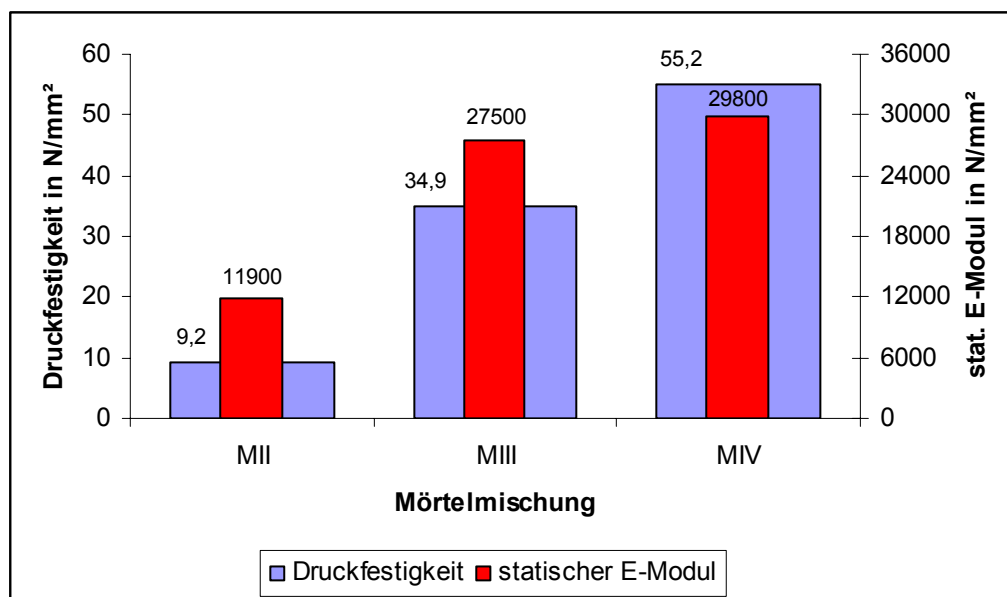


Abbildung 6.2.14: Druckfestigkeit und statischer E-Modul der Mischungen **MII** bis **MIV**

des Starkenbergs-Sandes, welche einen leichten Knick im Bereich 0,25 mm aufwies, mit Hilfe eines Quarzsandes 0,1 / 0,5 mm verbessert (siehe Anhang A 2-1).

Abbildung 6.2.14 zeigt die verschiedenen Druckfestigkeiten und statischen E-Moduln der drei Mörtel zum Prüfzeitpunkt (5 d nach der Herstellung).

Betrachtet man diese Ergebnisse bezüglich ihres Prüfaltes, kann davon ausgegangen werden, dass beim Keilversuch durch die gewählten Mörtelmischungen ein großer Bereich der Normalbetone (geschätzt: bis ca. C50/60) abgedeckt wurde. Eine längere Lagerungsdauer (28 Tage) würde zwar die Festigkeiten nach [63] bei **MIV** (Fertigteilzement) noch mindestens um weitere 10 % und bei **MII** und **MIII** um ca. 20 % erhöhen, die Zugabe größerer Gesteinskörner könnte aber wieder zu einer leichten Absenkung führen. Die

ermittelten „Geldruckwerte“ (s. u.) sind demnach durchaus Größenordnungen, die in den hauptsächlich AKR-gefährdeten Betonen auftreten können (z. B. Straßenbaubeton C30/37 bis C35/45). Bei Betonen mit höheren Festigkeiten nimmt dann das dichter werdende Gefüge an Bedeutung zu, so dass der für eine AKR notwendige Feuchtetransport eingeschränkt wird und die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten eines Schadens wieder sinkt. Außerdem erhöht sich dann auch der Widerstand gegenüber einer initialen Rissbildung im Gefüge (steigende Sprödhheit fördert jedoch die Rissfortsetzung).

Im nachfolgenden Diagramm werden die verschiedenen Zugfestigkeiten der Mörtel dargestellt. Es wird deutlich, dass Spaltzugfestigkeit und Oberflächenzugfestigkeit bei **MII** und

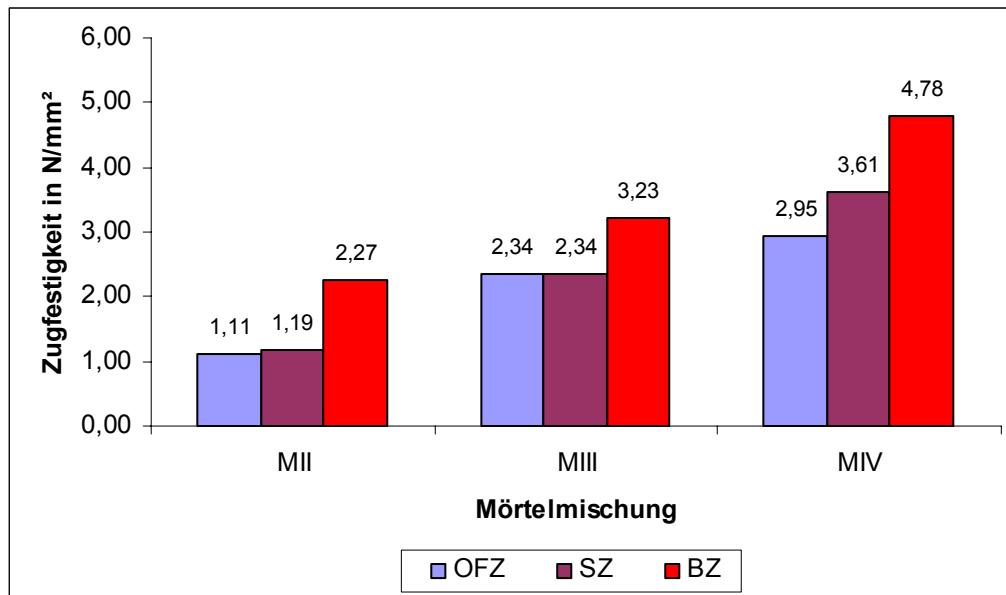


Abbildung 6.2.15: ermittelte Zugfestigkeiten der verschiedenen Mörtelmischungen

**MIII** nahezu identisch waren, bei **MIV** dann aber auseinander liefen. Die Spaltzugfestigkeit korrelierte dabei insgesamt besser mit der Biegezugfestigkeit (Korrelationskoeffizienten:  $R_{OFZ} = 0,947$ ,  $R_{SZ} = 0,994$ ), welche aufgrund der nicht axialen Lasteintragung stets am höchsten lag.

Bevor im Weiteren auf die gemessenen gefügezerstörenden Drücke eingegangen wird, soll noch einmal kurz die exakte Datenermittlung mit Hilfe der Universalprüfmaschine am Beispiel des Probekörpers  $\varnothing = 46$  mm (**MII**) beschrieben werden:

Nach Einsetzen des Prüfzylinders (mit locker eingestecktem Keil) in die Prüfmaschine, fuhr man die obere gelenkig gelagerte Stahlplatte manuell bis unmittelbar über den Keil. Computergesteuert wurde nun eine Vorbelastung von 10 N aufgebracht und der Versuch gestartet. Mit einer Belastungsgeschwindigkeit von 10 N/s (entspricht nach {GI.5}  $0,11 \text{ N/mm}^2$  „Geldruckerhöhung“ je Sekunde) wurde der Metallkeil so lange in die Rundstahlhälften gepresst, bis es zum plötzlichen Druckabfall durch das Aufreißen des Probekörpers und damit dem fast vollständigen Eindringen des Keiles kam. Kraft, Zeit und zurückgelegter Weg (= Traversenweg) wurden per PC ausgewertet.

In der nachfolgenden Tabelle 6.2.1 werden nun zusammenfassend die Mittelwerte der einem Ausreißertest nach GRUBBS (angesetzte Irrtumswahrscheinlichkeit: 5 %) unterzogenen Messergebnisse für die Kräfte  $F$  in Abhängigkeit von Mörtelmischung und Probendurchmesser aufgeführt. Die nach {GI. 5} berechneten zugehörigen Größen des

entsprechenden „Geldruckes“ im Korn werden ebenfalls dargestellt. (Detailliertere Mess- und Rechenwerte mit Angaben zu Standardabweichungen und Ausreißertest können den Anhängen A 5 bis A 16 entnommen werden)

Beispielrechnung für  $P_{Gel}$  bei Prüfcylinder  $\varnothing = 46$  mm (**MII**):

Mörtelmischung	Durchmesser in mm	Mörteldeckung in mm	Kraft F in N	$P_{Gel}$ in N/mm <sup>2</sup>
II	35	8,5	511	6
II	46	14,0	1068	12
II	55	18,5	1443	16
II	72	27,0	1806	21
III	35	8,5	1113	13
III	46	14,0	1858	21
III	55	18,5	2999	34
III	72	27,0	4865	55
IV	35	8,5	1397	16
IV	46	14,0	2573	29
IV	55	18,5	3884	44
IV	72	27,0	6156	70

Tabelle 6.2.1: Gesamtübersicht der gemessenen Kräfte F und der berechneten Geldrücke  $P_{Gel}$

$$P_{Gel} = \frac{F}{2 * \tan(1,4^\circ) * 1800} = \frac{1068}{2 * \tan(1,4^\circ) * 1800} \approx 12 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

Betrachtet man nun die oben dargestellte Tabelle, wird bereits auf den ersten Blick deutlich, dass mit zunehmenden Probendurchmesser und wachsender Mörtelfestigkeit der notwendige gefügezerstörende innere Druck stark ansteigt. Hierbei werden erhebliche Größenordnungen erreicht! Inwieweit diese Messergebnisse aus dem Versuch in die Realität übertragbar sind, soll im Folgenden noch einmal näher beleuchtet werden. Zu erkennen ist aber bereits an dieser Stelle, dass bisher u.a. in KRULL [36, 37], WEN [77] und YIN [80] an synthetisch hergestellten Gelen gemessene reine Quelldrücke unter Umständen nicht ausreichen können, um eine nicht vorgeschädigte Mörtelmatrix, welche das Korn umgibt, zum Aufreißen zu bringen.

Nachfolgende Abbildungen zeigen, auf welche Art und Weise die Drücke im Korn abhängig vom untersuchten Mörtel mit zunehmender Einbettung ansteigen.

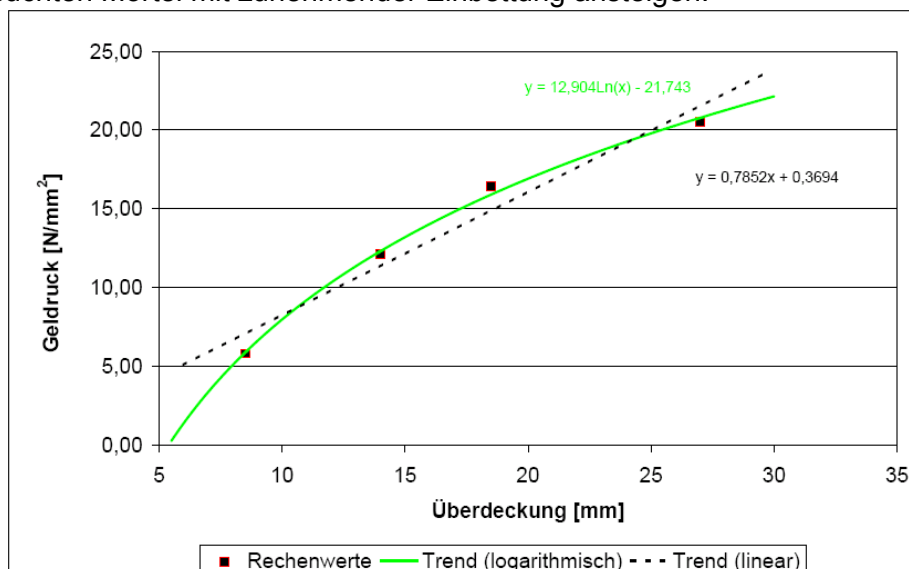


Abbildung 6.2.16: die Mörtelmatrix zerstörender Geldruck im Korn (Mischung MII)



Durch die Trendkurven für **MII** wird erkennbar, dass – entgegen der ursprünglichen Erwartung eines exponentiellen Anstiegs – die Zunahme des Geldruckes durch eine logarithmische Funktion ausgedrückt werden konnte. Die Ursache ist hier definitiv im Gefüge zu suchen. Es ist sehr wahrscheinlich, dass die Einflüsse aus Porosität und Unstetigkeiten (z. B. weitere Gesteinskörner in der Bruchzone) mit zunehmender Entfernung zum rissbildenden Korn stark ansteigen. Da **MII** die poröseste Mischung war, ist die logarithmische Trendkurve hier auch am besten nachvollziehbar.

Auch rein logisch gesehen sollte der Einfluss der Einbettung ab einer bestimmten Größenordnung wieder abnehmen, da sich im Betongefüge die Überdeckung zwischen den einzelnen

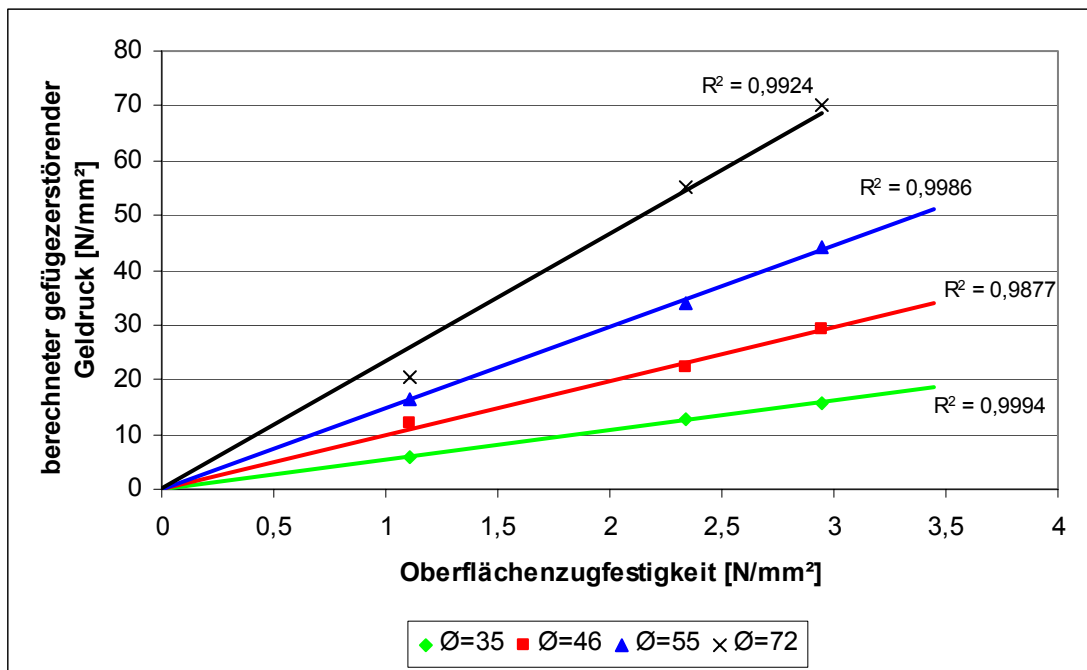


Abbildung 6.2.17: Korrelation zwischen Geldruck und OFZ für verschiedene Prüfkörperdurchmesser

Körnern nicht ins Unendliche steigern lässt. Durch weitere mathematische Untersuchungen sollte gezeigt werden, inwieweit die erhaltenen Messwerte des gefügezerstörenden Druckes mit anderen Mörtelkennwerten korrelieren.

Wie Abb. 6.2.17 zeigt, konnten dabei für jeden einzelnen Probendurchmesser ausgezeichnete Zusammenhänge zwischen gemessenem inneren Druck und der Oberflächenzugfestigkeit festgestellt werden. Das Bestimmtheitsmaß lag hier jeweils über 98 %. In dem Diagramm (Abb. 6.2.17) ist klar zu erkennen, dass sich die Anstiege der Regressionsgeraden mit zunehmenden Durchmessern erhöhen. So kann davon ausgegangen werden, dass insgesamt eine gute Wiederholbarkeit der Messungen für jeweils einen Durchmesser bei unterschiedlichen Mischungen gegeben ist, sich aber die gemessenen Kräfte mit steigender Mörteldeckung überproportional erhöhen, also wahrscheinlich eine immer stärkere Überschätzung der gefügezerstörenden Geldrucke stattfindet. Dieser Umstand erschwerte auch die mögliche Hochrechnungen für den Geldruck mit Hilfe der Oberflächenzugfestigkeit. Dennoch wird hier der Versuch unternommen, eine Gleichung zur Hochrechnung des Geldruckes in Abhängigkeit der Mörteldeckung eines Probekörpers und der OFZ aufzustellen. Dafür wurden die Anstiege der Regressionsgeraden der einzelnen Mörteldeckungen

betrachtet und unter Verwendung eines quadratischen Ansatzes der Form  $y = ax^2 + bx + c$  folgende Gleichung entwickelt:

$$A = 0,02679x^2 + 0,2794x \quad \text{mit} \quad A = \text{Anstieg der Regressionsgeraden } (P_{\text{Gel}}/\text{OFZ})$$

$x = \text{Mörteldeckung}$

(Die Herleitung dieser Gleichung und ein Berechnungsbeispiel können den Anhängen A 15 und A 16 entnommen werden)

Mit Hilfe dieses Ausdruckes ist es somit möglich, anhand der OFZ eines Mörtels Aussagen für den gefügezerstörenden Geldruck bei einem bestimmten Probendurchmesser zu treffen. Allerdings ist hier zu berücksichtigen, dass die Gleichung lediglich aus den relativ wenigen erhaltenen Messwerten entstanden ist und diese oft mit großen Standardabweichungen verbunden waren. Durch weitere Versuche mit Zwischendurchmessern und differierenden Mörtelfestigkeiten sollte die Exaktheit der Gleichung für derartige Vorhersagen überprüft werden.

Zur Veranschaulichung soll mit diesem Ansatz ein benötigter Geldruck für eine Rissbildung in einem reaktiven Gesteinskorn in einer Betonstraßendecke errechnet werden. Die Oberflächenzugfestigkeit der Betonfläche wird mit  $1,5 \text{ N/mm}^2$  angenommen und die Überdeckung des reaktiven Korns mit 10 mm. Wird dieser Wert für die Überdeckung in die oben angegebene Gleichung eingesetzt so erhält man:

$$A = 0,02679 \cdot 10^2 + 0,2794 \cdot 10$$
$$A = 5,473$$

Somit ergibt sich  $P_{\text{Gel}}$  durch Multiplizieren von A mit der Oberflächenzugfestigkeit:

$$P_{\text{Gel}} = A \cdot \text{OFZ} = 5,473 \cdot 1,5 \text{ N/mm}^2$$
$$P_{\text{Gel}} = 8,2 \text{ N/mm}^2$$

Vergleicht man diesen Wert mit denen in Abschnitt 6.1 vorgestellten Zugfestigkeiten von Gesteinskörnungen und den in Abschnitt 5 in dieser Arbeit ermittelten Geldrücken, so ist die Möglichkeit eines Schadens durch ein Quellen eines AK-Gels gegeben. Um sehr viel genauere Angaben zu möglichen Spannungen am Rissansatz, aber auch in der Umgebung des Gesteinskorns machen zu können, scheint nach Betrachtung der hier verwendeten Berechnungsmethode und weiterer diverser Modellansätze in [44] usw. sowie dem Versuch, selbst ein passendes analytisches Modell zu entwickeln, die Umsetzung des Versuchsaufbaus und damit die Spannungsbestimmung nur mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode möglich. Über solch ein numerisches Näherungsverfahren könnten dann weiterhin bessere Aussagen für unterschiedlichste Mörtelbettungen und Materialien getroffen werden. Allerdings besteht hier das Problem, dass es bisher nur sehr schwer möglich ist, inhomogene und anisotrope Stoffe ausreichend genau zu simulieren. Betone und Mörtel werden meist als homogen betrachtet bzw. mittlerweile durch 2-Phasen-Modelle dargestellt.

### 6.3 Zusammenfassung

Der Frage nach der Höhe des Quelldruckes für eine Zerstörung eines Betongefüges wurde in den Abschnitten 6.1 und 6.2 nachgegangen. Dabei zeigte sich, dass sowohl die Gesteinszugfestigkeiten als auch die simulierten Geldrücke im Gefüge sehr hohe Werte lieferten. Die Gesteinszugfestigkeiten bewegen sich zwischen ca. 2 N/mm<sup>2</sup> bis 22 N/mm<sup>2</sup> und die ermittelten simulierten Geldrücke liegen noch deutlich darüber. Es ergaben sich Werte im Bereich von 6 N/mm<sup>2</sup> bis nahezu 70 N/mm<sup>2</sup> bei der stärksten Einbettung. Dass diese Ergebnisse jedoch kritisch zu bewerten sind, machte die Gegenüberstellung von Faktoren, welche auf eine Über- bzw. Unterschätzung der mittels dieses Versuchsaufbaus bestimmten Drücke hindeuteten, klar. Insbesondere Reibungseinflüsse beim Prüfvorgang könnten demnach zur Verfälschung der Messwerte beigetragen haben. Korrelationsberechnungen ergaben gute Zusammenhänge z.B. zwischen den berechneten Geldrücken und den Oberflächenzugfestigkeit der verschiedenen Mörtel, weshalb auf eine gute Wiederholbarkeit der Messungen mittels der entwickelten Apparatur geschlossen werden konnte und Hochrechnungen für Geldrücke bei bekannter Oberflächenzugfestigkeit und einem bestimmten Probendurchmesser möglich wurden.

Mit den bisherigen in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnissen können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- 1 Ein Quelldruck kann in einem AK-Gel nur bei einer bestimmten Menge an eingebautem Calcium aufgebaut werden.
- 2 Diese Quelldrücke können deutlich über 10 N/mm<sup>2</sup> liegen.
- 3 Die im Beton verwendeten Gesteinskörnungen und auch die sie umschließende Mörtelmatrix können mit Quelldrücken in den hier bestimmten Größenordnungen zerstört werden.
- 4 Die im Abschnitt 3 vorgestellten Modelle zur Alkali-Kieselsäure-Reaktion müssen um den Einbau des Calciums in ein entstandenes AK-Gel erweitert werden.

## 7 Untersuchungen zur Geschwindigkeit der Alkali-Kieselsäure-Reaktion

Die in Abschnitt 5 vorgestellten Messergebnisse zeigen, dass der eigentliche Quellvorgang eines Alkali-Silikat-Gels in sehr kurzer Zeit zu das Betongefüge zerstörenden Drücken führen kann. Es stellt sich damit die Frage, wieso der Schadensverlauf an Bauteilen und Bauwerken erheblich längere Zeiträume in Anspruch nimmt. Mögliche Einflussfaktoren auf den zeitlichen Ablauf der Reaktion sind die Geschwindigkeit des Einbaus von Calcium in ein Wasserglas und die Geschwindigkeit der Lösung der Kieselsäure aus den reaktiven Gesteinskörnern. In den folgenden beiden Abschnitten soll dieser Fragestellung nachgegangen werden.

### 7.1 Reaktionsgeschwindigkeit zwischen Alkaliwassergläsern und Portlandit

Eine entscheidende Einflussgröße auf die Reaktionsgeschwindigkeit und das Schädigungspotenzial einer AKR ist die Geschwindigkeit des Einbaus des Calciums in ein entstandenes Wasserglas. Wie die in Abschnitt 5 vorgestellten Messergebnisse zeigen, ist der Calciumanteil im Gel ein wichtiger Parameter für die Quelleigenschaften eines AK-Gels. Um die Reaktionsgeschwindigkeit zu beschreiben, wurde die Änderung der Leitfähigkeit in einer Wasserglaslösung bei Portlanditzugabe gemessen. Diese Versuche dienen zur Orientierung, ob diese Reaktion der geschwindigkeitsbestimmende Schritt sein könnte.

#### **Versuchsbeschreibung**

Es erfolgte eine kontinuierliche Messung der Leitfähigkeit, wobei die Proben in einem Becherglas mit einem Magnetrührer ständig in Bewegung gehalten wurden. In 60 ml destilliertes Wasser wurden die Wassergläser tropfenweise zugegeben bis sich die Leitfähigkeit auf ca. 10 mS/cm einstellte, nach 0,2 h konstanter Leitfähigkeit erfolgte die Zugabe von 0,5 g Portlandit als Feststoff. Nach Beendigung der Leitfähigkeitsmessung erfolgt eine Analyse der Lösung auf die enthaltenen Ionenkonzentrationen. Das sich während der Messung gebildete Gel wird getrocknet und im ESEM EDX auf Struktur und Zusammensetzung untersucht.

#### **Ergebnisse**

In den folgenden drei Grafiken sind die Leitfähigkeiten der untersuchten Wasserglaslösungen dargestellt (Abb. 7.1.1, 7.1.2, 7.1.3). Während der Versuchsdauer bildete sich bei allen Proben in den Lösungen eine gelartige Phase. Die reinen Wasserglasproben zeigen einen konstanten oder einen abnehmenden Verlauf der Leitfähigkeit über den Versuchszeitraum. Die Proben mit dem zugegebenen Portlandit verzeichnen zunächst einen Anstieg und zu späteren Zeitpunkten einen Abfall der Leitfähigkeit. Im weiteren Verlauf ab ca. 150 Stunden Versuchsdauer bleibt diese dann relativ konstant. Das bedeutet, die Reaktionen sind innerhalb von 200 Stunden abgelaufen bzw. ein Gleichgewicht hat sich in dieser Zeit eingestellt. In der folgenden Tabelle (Tab. 7.1.1) befindet sich eine Gegenüberstellung der berechneten Ionenmenge in den Ausgangslösungen in mg zu den gemessenen Ionenkonzentrationen der Lösungen nach Beendigung der Leitfähigkeitsmessungen sowohl in mg/l als auch in % bezogen auf die Gesamtmenge. Die Werte in der Tabelle zeigen, dass bei den Natrium- und Kaliumwassergläsern nur sehr geringe Mengen Calcium in Lösung gegangen sind.

### Leitfähigkeit K-Wassergläser

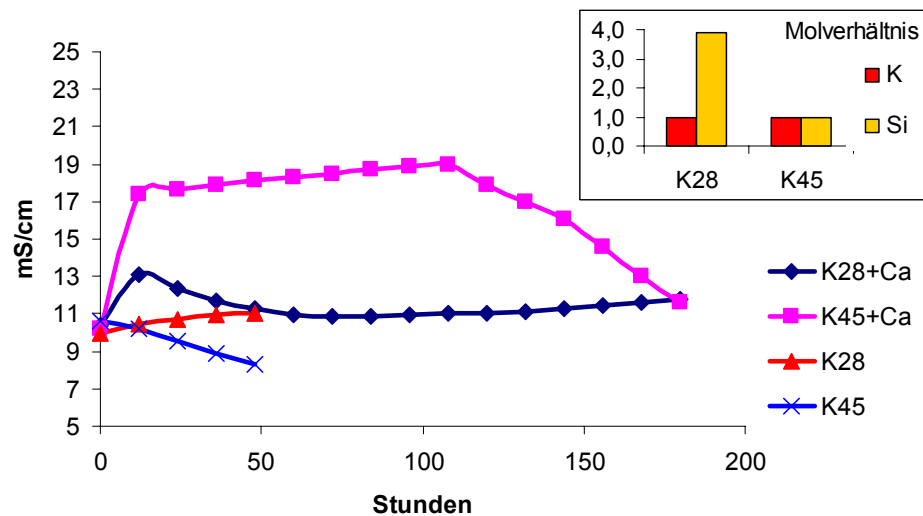


Abb. 7.1.1: Leitfähigkeiten von Kaliumwasserglaslösungen mit und ohne Portlandit

### Leitfähigkeit Na-Wassergläser

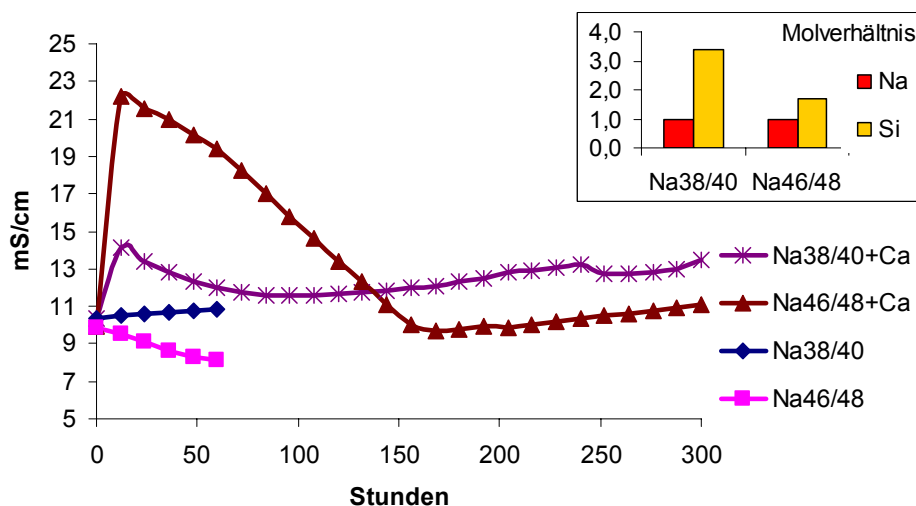


Abb. 7.1.2: Leitfähigkeiten von Natriumwasserglaslösungen mit und ohne Portlandit

### Leitfähigkeit Li-wassergläser

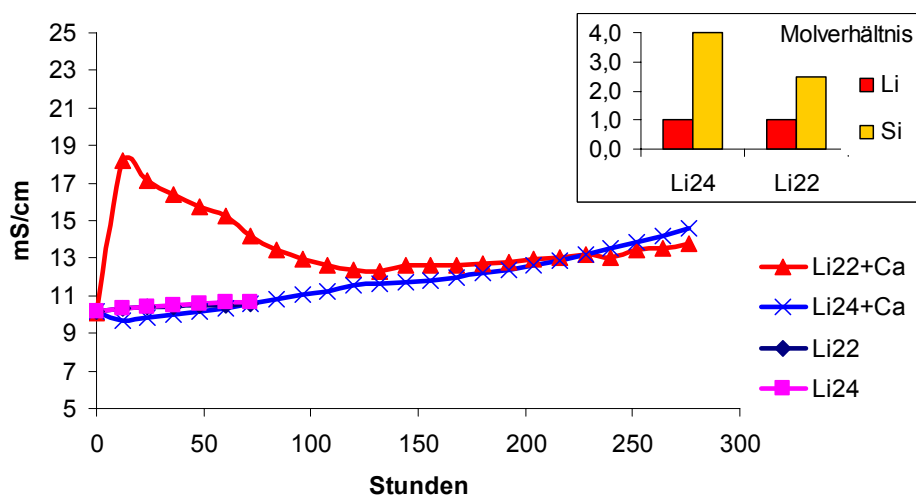


Abb. 7.1.3: Leitfähigkeiten von Lithiumwasserglaslösungen mit und ohne Portlandit



Tab. 7.1.1: berechnete Ausgangsionenkonzentration und gemessene Ionenkonzentration der Lösungen nach Beendigung der Versuche

	K 28		K 45		Li 22		Li 24		Na 38/40		Na 46/48	
	Ausgang	Lösung	Ausgang	Lösung	Ausgang	Lösung	Ausgang	Lösung	Ausgang	Lösung	Ausgang	Lösung
	in mg	in mg/l	in mg	in mg/l	in mg	in mg/l	in mg	in mg/l	in mg	in mg/l	in mg	in mg/l
Si	6967	514	870	185	8393	1640	15006	5910	10036	979	3116	421
Na	0	0	0	0	0	0	0	0	4827	3750	3091	3030
K	4949	4020	2208	2660	0	0	0	0	0	0	0	0
Li	0	0	0	0	2664	1490	2977	1830	0	0	0	0
Ca	4272	12	4478	9	4248	376	4047	985	4284	42	4448	188
	in %	in %	in %	in %	in %	in %	in %	in %	in %	in %	in %	in %
Si	100	7	100	21	100	20	100	39	100	10	100	14
Na	-	-	-	-	-	-	-	-	100	78	100	98
K	100	81	100	120	-	-	-	-	-	-	-	-
Li	-	-	-	-	100	56	100	61	-	-	-	-
Ca	100	0	100	0	100	9	100	24	100	1	100	4

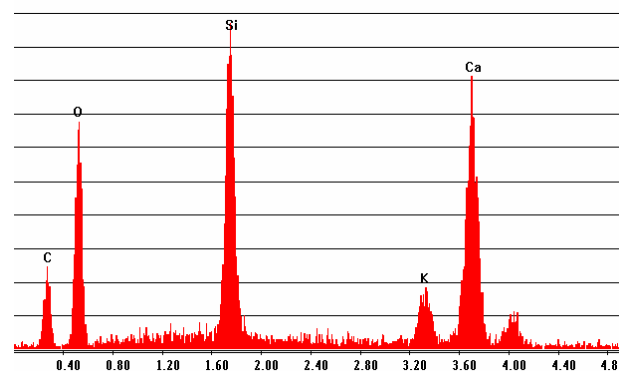
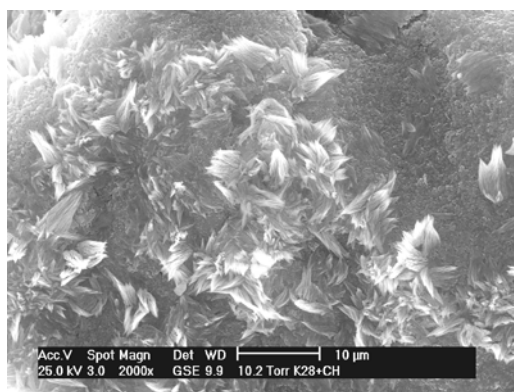


Abb. 7.1.4: ESEM-Aufnahme eines getrockneten Gels aus Probe K28 + Ca(OH)<sub>2</sub> und zugehörige EDX-Analyse

Dagegen befindet sich in den Lithiumwassergläsern das Calcium mit deutlich höheren Konzentrationen in der Lösung. Bei den Natrium- und Kaliumwassergläsern sind zwischen 80 % bis 100 % der Alkalien in den Lösungen zu finden wogegen bei den Lithiumwassergläsern nur 55 % bis 60 % der Alkalien in Lösung gehen. Die Untersuchungen der gelartigen Feststoffphase mittels ESEM EDX zeigen bei hohem Modul teilweise C-S-H-Phasen in den getrockneten Gel-Proben und in allen Proben finden sich Portlandit und Wasserglasstrukturen. Beispielhaft ist in Abbildung 7.1.4 eine C-S-H-Struktur mit zugehöriger EDX-Analyse aus einer Probe mit Kaliumwasserglas und Portlandit dargestellt.

### Schlussfolgerungen

Es erfolgt eine schnelle Einstellung eines Gleichgewichtes in den Lösungen (< 200h). Dabei gehen große Mengen an Alkalien in Lösung, das bedeutet die Wassergläser werden gelöst. Es kann teilweise eine Reaktion des Wasserglases mit Portlandit unter C-S-H-Phasenbildung und Alkalifreisetzung nachgewiesen werden. Je nach Ionenkonzentration ist ein schneller Einbau des Calciums in ein Alkaliwasserglas möglich. Diese Reaktion beweist den immer wieder zitierten Praxisfall, dass solange Portlandit im System vorhanden ist, immer wieder Alkalien aus dem Alkalisilicatgel freigesetzt werden können.

Somit findet eine schnelle Reaktion zwischen den Wassergläsern und dem Portlandit statt. Der Calciumeinbau in die AK-Gele kann also nicht der geschwindigkeitsbestimmende Schritt einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion sein.

## 7.2 Bestimmung der Löslichkeit von Kieselsäure- und Aluminiumverbindungen ausgewählter Gesteine in Natronlauge

Da in der Literatur bisher nur unbefriedigende Aussagen zur Löslichkeit der Kieselsäure in Gesteinskörnungen vorliegen (siehe Abschnitt Gesteinskörnung in 3.1), sollen in einer kleinen auf wenige Gesteine begrenzten Versuchsreihe Informationen zu dieser Fragestellung gewonnen werden. Für diese Untersuchung wurden ein Diabas, drei Grauwacken, drei Rhyolithen und ein Granit/Gneis herangezogen. Diese Gesteine werden mit den klassischen Untersuchungsmethoden von nicht reaktiv bis schwach reaktiv eingestuft. Die genaue Zuordnung ist in Tabelle 7.2.1 angegeben. Die grau hinterlegten Gesteine sind im Mörtelschnelltest als reaktiv eingestuft worden. In dieser Tabelle sind weiterhin die ermittelten Kristallitgrößen und der Strain der Quarzbestandteile in den einzelnen Gesteinen aufgeführt. Eine allgemeine Gültigkeit dieser Werte ist nicht gegeben.

Tab. 7.2.1: Kristallitgrößen, Strain und Dehnung im MST der untersuchten Gesteine

	Kristallitgröße in nm	Strain in %	Dehnung im MST in mm
Grauwacke D	214	0,087	3,59
Grauwacke B	270	0,103	1,72
Grauwacke K	316	0,069	3,54
Rhyolith G	263	0,071	2,47
Rhyolith L	240	0,027	0,66
Rhyolith T	306	0,077	3,93
Granit/Gneis	366	0,081	1,83

### Durchführung

Alle Gesteinsproben wurden aus der Fraktion 8/16 mm entnommen und auf 0,5/1,0 mm gebrochen. Von den so erhaltenen Körnungen wurden 10 g Proben in 10 g NaOH-Lösung mit pH-Werten 13,3 und 14,0 bei 20°C und CO<sub>2</sub>-Ausschluss eingelagert. Über die Versuchsdauer von 395 Tagen erfolgte eine zyklische Analyse und Erneuerung der Lösung.

### Ergebnisse

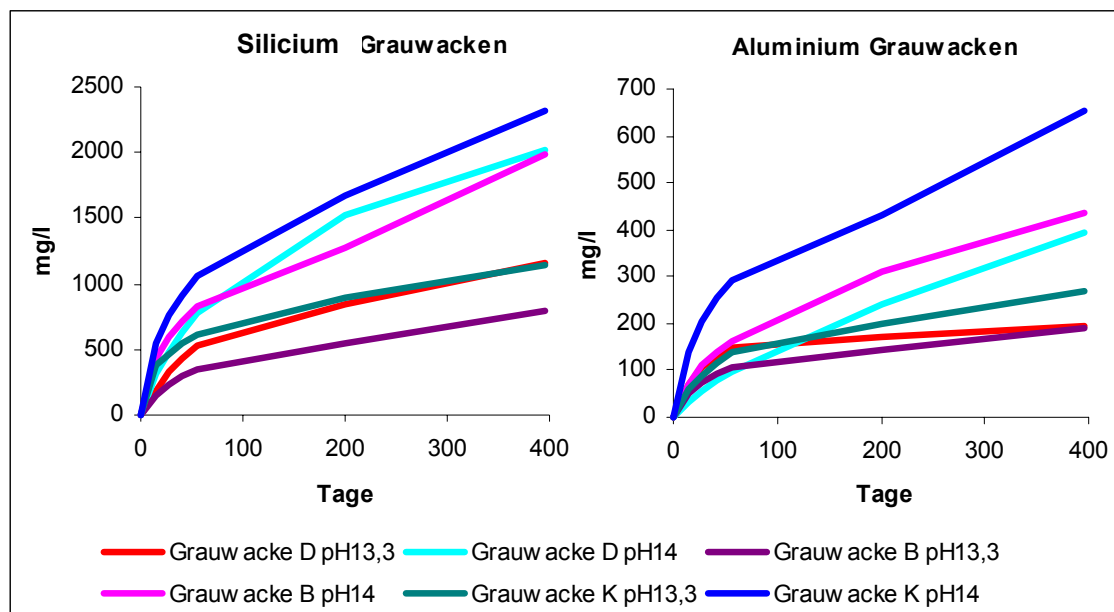


Abb. 7.2.1: Silicium- und Aluminiumlöslichkeit von Grauwacken in NaOH-Lösung

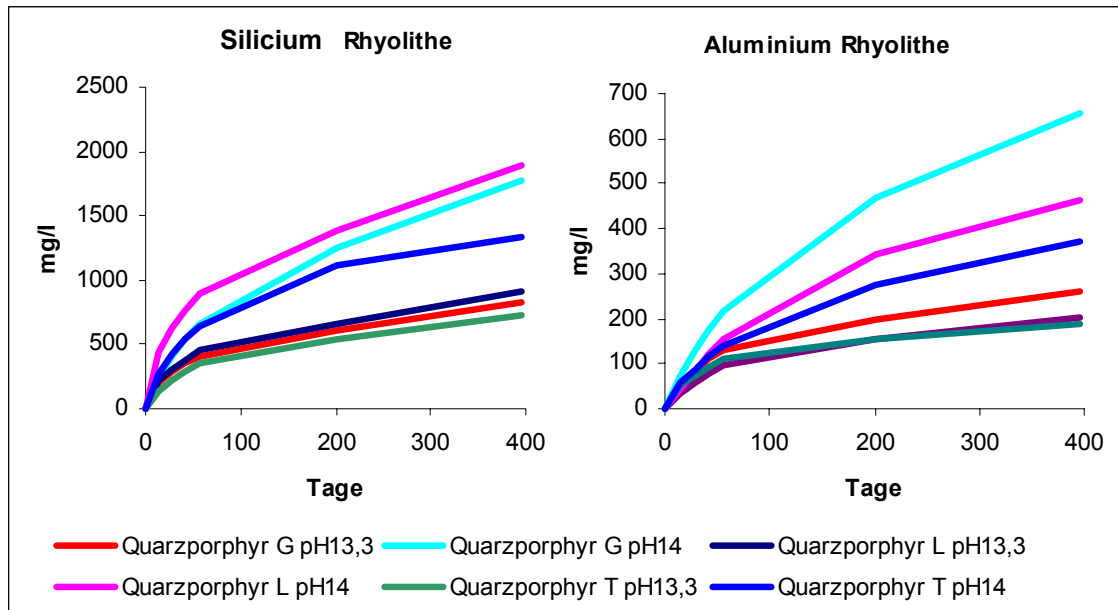


Abb. 7.2.2: Silicium- und Aluminiumlöslichkeit von Rhyolithen in NaOH-Lösung

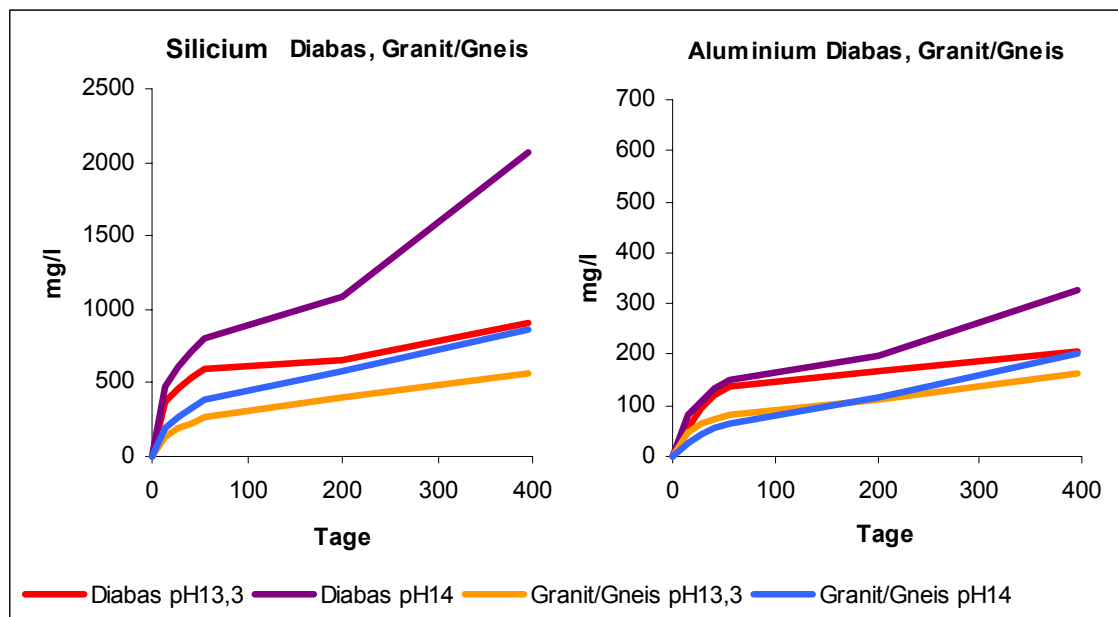


Abb. 7.2.3: Silicium- und Aluminiumlöslichkeit von Diabas und Granit/Gneis in NaOH-Lösung

Im Vergleich mit Tabellenwerten zur Löslichkeit von amorpher Kieselsäure und Quarz liegen die ermittelten Werte für alle untersuchten Gesteinskörnungen zwischen den „Grenzwerten“ von amorpher und gut kristallisierter Kieselsäure.

In den Grafiken 7.2.1 bis 7.2.3 ist der Konzentrationsverlauf an Silicium und Aluminium, zugeordnet zu den jeweiligen Gesteinen und den pH-Werten der Lösungen, aufgetragen. Bei allen Lösungskurven ist ein logarithmischer Anstieg mit einer Annäherung an einen Grenzwert ersichtlich. Nach einer Lagerungsdauer von 395 Tagen ist bei keiner Probe ein Ende des Lösevorganges zu erkennen. Im Folgenden soll das Verhalten der einzelnen Gesteine genauer betrachtet werden.

## Grauwacken

Bei einem pH-Wert von 13,3 hat die nach Mörtelschnelltest (MST) schwach reaktive Probe B die niedrigste Löserate für Silicium und Aluminium. Ein solcher Zusammenhang zwischen Löserate und Reaktivität im Mörtelschnelltest lässt sich bei pH=14 nicht nachweisen. Bei beiden untersuchten pH-Werten entsteht kein Zusammenhang zwischen Löslichkeit und Kristallitgrößen oder Strain. Die schwach reaktive Probe B hat den höchsten Strain! Das Kieselsäure zu Aluminium-Löslichkeitsverhältnis zeigt bei Probe B den kleinsten Wert. Dies deckt sich mit Angaben aus der Literatur zur Reaktivität von Grauwacken (analog zu Diss. Hill [27]). Nach über 1 Jahr Lagerung sind weniger als 5 %  $\text{SiO}_2$  bezogen auf den Gesamtkieselsäuregehalt in Lösung gegangen (siehe Abb. 7.2.4)!

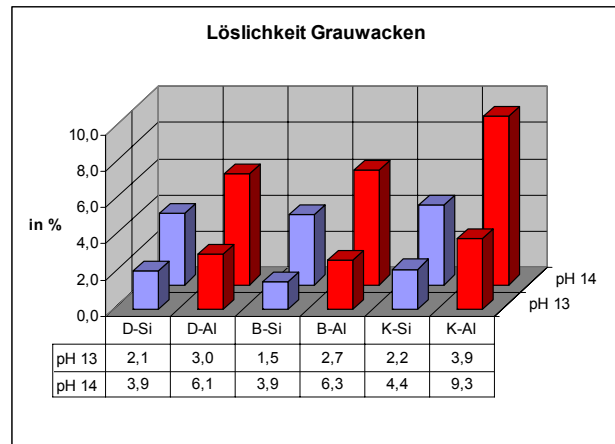


Abb. 7.2.4: Kieselsäure- und Aluminiumlöslichkeit in % bezogen auf die Gesamtanteile im Gestein

## Rhyolithe

Alle Rhyolith-Proben haben bei gleichem pH-Wert annähernd gleiche Löseraten der Kieselsäure. Es ist kein Zusammenhang zwischen dem Lösungsverhältnis Si/Al und einer Reaktivität nach MST zu erkennen. Ebenfalls gibt es keinen Zusammenhang zwischen den Kristallitgrößen der Gesteine und ihrer Reaktivität nach MST. Die Proben G und T haben einen höheren Strain als Probe L und die Proben G und T sind laut MST auch als reaktiv einzustufen.

Nach über 1 Jahr Lagerung sind weniger als 4 % Kieselsäure bezogen auf den Gesamtgehalt aus den untersuchten Gesteinen herausgelöst worden.

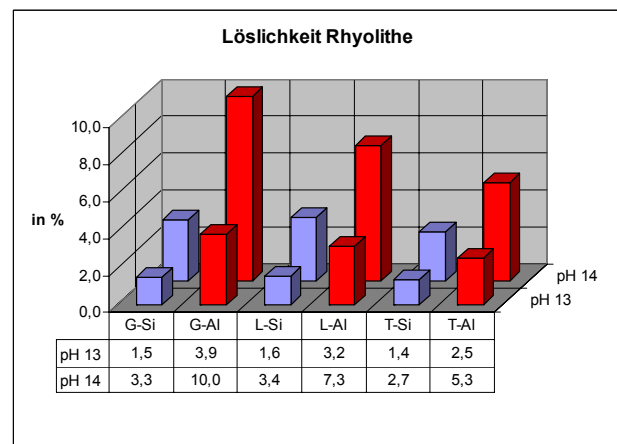


Abb. 7.2.5: Kieselsäure- und Aluminiumlöslichkeit in % bezogen auf die Gesamtanteile im Gestein

## Diabas

Der Diabas zeigt ähnlich hohe Löseraten wie die anderen untersuchten Gesteine, dieses Verhalten kann mit der für Diabase untypischen Anwesenheit von Feinquarz im Gestein und dessen Auflösung während der Lagerung erklärt werden. Auf eine Reaktivität hinsichtlich einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion kann anhand dieser Löslichkeit wie auch bei allen anderen untersuchten Gesteinen nicht geschlossen werden. Die prozentuale Löslichkeit der enthaltenen Kieselsäure- und Aluminiumverbindungen ist in Abbildung 7.2.6 dargestellt.

### Granit/Gneis

Diese Probe hat die niedrigsten Löseraten aller untersuchten Materialien. Die geringe Löslichkeit und die großen Kristallitgrößen der Probe passen gut zusammen. Der sehr hohe Strain dieser Probe korreliert mit der vorhandenen Reaktivität im Mörtelschnelltest (MST). Weiter Aussagen können zu dieser Probe anhand der vorhandenen Messergebnisse nicht getroffen werden.

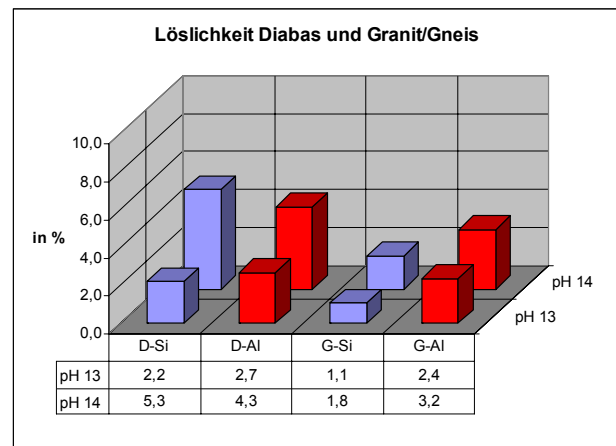


Abb. 7.2.6: Kieselsäure- und Aluminiumlöslichkeit in % bezogen auf die Gesamtanteile im Gestein

## 7.3 Zusammenfassung

Im Abschnitt 7 werden Ergebnisse von Untersuchungen zur Geschwindigkeit der Alkali-Kieselsäure-Reaktion vorgestellt. Es konnte nachgewiesen werden, dass der Einbau des Calciums in ein Gel sehr schnell erfolgen kann und das Calcium dadurch keinen verzögernden Einfluss auf die Kinetik der Schadensreaktion am Bauwerk oder Bauteil hat. Hingegen zeigen die einfachen Versuche in Abschnitt 7.2, dass die Lösungsvorgänge in den Gesteinen sehr langwierige Prozesse sind und somit diese Vorgänge entscheidenden Einfluss auf die Geschwindigkeit und damit auch auf den Ablauf der Schadensreaktion haben. Diese Ergebnisse zur Lösegeschwindigkeit der Kieselsäure decken sich mit Aussagen aus [3] und [68].

Alle untersuchten Gesteine zeigen eine Löslichkeit von Kieselsäure- und Aluminiumverbindungen unter den im Versuch eingestellten pH-Werten. Es steigt die Menge an gelöstem  $\text{SiO}_2$  und  $\text{Al}_2\text{O}_3$  mit steigendem pH-Wert bei allen Gesteinen an. Nach einer Lagerungsdauer von 395 Tagen sind die Lösevorgänge bei allen untersuchten Gesteinen noch nicht beendet, der Kurvenverlauf strebt langfristig einem Grenzwert bzw. einer Grenzkonzentration entgegen. Bei allen untersuchten Gesteinen handelt es sich um einen sehr langsamen Löseprozess, die Mengen an gelöster Kieselsäure liegen bei einem pH-Wert von 14 nach über einem Jahr Lagerung bei max. 5,3 %, die für Aluminiumoxid bei max. 10 %. Diese Ergebnisse decken sich mit Aussagen zur Kieselsäurelöslichkeit in vorangegangenen Untersuchungen [3].

Es lässt sich für keines der hier bearbeiteten Gesteine ein Zusammenhang zwischen der Löslichkeit der Gesteinsbestandteile und der Reaktivität im Mörtelschnelltest (MST) nachweisen.

Bei den untersuchten Rhyolithen finden sich Hinweise auf einen Zusammenhang zwischen Reaktivität nach MST und Strain der Quarzbestandteile in den Gesteinen und eine Abhängigkeit der Alkalireaktivität vom Verhältnis gelöstes Silicium zu gelöstes Aluminium kann bei den untersuchten Grauwacken andeutungsweise festgestellt werden.



## 8 Zusammenfassung

- 1 Um den Ablauf und Mechanismus der AKR besser beschreiben zu können, sollte das Quellverhalten von künstlich erzeugten Alkali-Kieselsäure-Gelen bestimmt werden. Dabei stellen sich folgende Fragen:
  - Welcher Vorgang zerstört die Gesteinskörner bzw. das Betongefüge?
  - Können Quellspannungen durch Wasseraufnahme die Schadensursache sein?
  - Hat in den Gelen enthaltenes Calcium einen entscheidenden Einfluss auf deren Quellvermögen?
  - Welche Druckspannungen werden bei der Reaktion im Gefüge erreicht?
  - Welche Druckspannungen sind nötig, um das Betongefüge aufzureißen?
- 2 Es wird in dieser Arbeit ein Überblick über den Stand des Wissens zum Mechanismus der Alkali-Kieselsäure-Reaktion gegeben und verschiedene Modellvorstellungen werden erläutert.
- 3 Untersuchungen zur Zusammensetzung und Struktur der Reaktionsprodukte einer AKR an Mörtel- und Betonprüfkörpern werden vorgestellt, um die in dieser Arbeit durchgeführten Messungen zu verifizieren.
- 4 Mit der in dieser Arbeit vorgestellten Versuchsanordnung ist es möglich, das Quellverhalten von synthetischen Alkalikieselsäure-Gelen zu bestimmen, es kann in Abhängigkeit der Zusammensetzung der Gele deren Quellpotential beschrieben werden. Dazu wurde eine stetige Flüssigkeitszufuhr über einen saugenden Zementstein realisiert. Die Apparatur kann sowohl für die Bestimmung einer Volumenänderung als auch einer Quelldruckentwicklung eingesetzt werden. Die durchgeführten Messungen erfolgten an synthetischen Alkalikieselsäure-Gelen, an handelsüblichen Wassergläsern und, dem natürlichen Vorbild folgend, an Lösungsversuchen mit verschiedenen Kieselsäurelieferanten.
- 5 In Vorversuchen wurde festgestellt, dass die aussagekräftigsten Ergebnisse bei den Versuchen mit künstlich hergestellten Gelen erreicht werden. An diesen Proben erfolgten die Messungen zur Bestimmung der Quelldruckentwicklung in Abhängigkeit der Versuchsdauer.
- 6 Es zeigte sich, dass hohe Alkaligehalte bei einer niedrigen Löslichkeit (durch geringe Mengen Calcium in der Probe hervorgerufen) hohe Quelldrücke erzeugen.
- 7 Ein Einfluss des Natrium-Kalium-Verhältnisses auf das Quellverhalten ist nicht zu erkennen.
- 8 Der Einfluss des Calciums im Gel zeichnet sich deutlich ab, ohne Calcium bauen die Proben keine Quelldrücke auf, bei zu hohen Calciumgehalten entstehen nicht quellfähige

Alkali-Calcium-Silikat-Hydrate. Ein quellfähiger Bereich kann von ca. 5 % bis zu ca. 30 % Calciumanteil im Gel angegeben werden.

- 9 Neben dem Einfluss des Calciumgehaltes auf das Quellverhalten der Gele ist auch ein Einfluss des Alkali-Silika-Verhältnisses in den Proben nachweisbar. Wird dieses Verhältnis in den Proben stark Richtung Kieselsäure verschoben, d. h. niedrige Alkalianteile im Gel, kommt es zu keinen Quellerscheinungen. Somit kann die Wirkung von AKR-vermeidenden Zusätzen (FA, Silika usw. siehe Abschn. 3.1) mit diesen Messungen bestätigt werden.
- 10 Aus diesen Erkenntnissen wird ein Bereich einer quellfähigen Zusammensetzung eines Gels angegeben.
- 11 In einem weiteren Teil dieser Arbeit werden Versuche zur Bestimmung des benötigten Geldruckes zur Zerstörung von Gesteinskörnern und der Mörtelmatrix vorgestellt. Die dabei ermittelten Daten und Erkenntnisse fügen sich gut in die entwickelte Theorie der Quelldruckentwicklung der synthetischen AK-Gele ein. Es kann gezeigt werden, dass die Drücke bzw. die sich aufbauenden Zugspannungen für die Zerstörung eines Gesteinskorns oder der Matrix durch ein quellfähiges Gel erzeugt werden können.
- 12 Eine letzte Versuchreihe zeigt Einflüsse auf die Kinetik einer Alkalikieselsäurereaktion. Es werden der Einbau des Calciums in ein Wasserglas und die Löslichkeit der Kieselsäure aus den Gesteinskörnungen unter hohen pH-Werten untersucht. Besonders wird hierbei auf die Reaktionsgeschwindigkeiten geachtet. Es zeigt sich, dass der Calciumeinbau sehr schnell erfolgen kann, hingegen die Lösung der Kieselsäure aus den verschiedenen Gesteinen einen sehr langsamen Prozess darstellt.
- 13 Mit den in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnissen können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:
  - Ein Quelldruck kann in einem AK-Gel nur bei einer bestimmten Menge an eingebautem Calcium aufgebaut werden.
  - Diese Quelldrücke können deutlich Werte über 10 N/mm<sup>2</sup> erreichen.
  - Die im Beton verwendeten Gesteinskörnungen und auch die sie umschließende Mörtelmatrix können mit Quelldrücken in den hier bestimmten Größenordnungen zerstört werden.
  - Die im Abschnitt 3 dieser Arbeit vorgestellten Modelle zur Alkali-Kieselsäure-Reaktion müssen um den Einbau des Calciums in ein entstandenes AK-Gel erweitert werden.

## Literaturverzeichnis

- [1] **Aue, W. ; Dahms, J.**  
„Der Einfluss von Flint auf die Alkalireaktion im Beton“ S. 602 - 609  
*Fachzeitschrift Beton, 51. Jahrgang Nr.11/2001 Verlag Bau + Technik GmbH, Düsseldorf*
- [2] **Bektas, F. ; Turanli, L. ; Monteiro, P.J.M.**  
„A PRELIMINARY STUDY OF THE EFFICIENCY OF CRUSHED BRICK BLENDED CEMENT IN REDUCING ASR“ Volume I S. 479 - 482  
*Proceedings of the 12th ICAAR, October 15 – 19, 2004 Beijing, China*
- [3] **Berninger, A. M.** Dissertation:  
„Mikrostrukturelle Eigenschaften von Quarz als Bestandteil spät reagierender, alkaliempfindlicher Zuschläge“  
*Bauhaus-Universität Weimar, 2004*
- [4] **Bérubé, M. - A. ; Tremblay, C.**  
„CHEMISTRY OF PORE SOLUTION EXPRESSED UNDER HIGH PRESSURE – INFLUENCE OF VARIOUS PARAMETERS AND COMPARISON WITH THE HOT-WATER EXTRACTION METHOD“ Volume II, S. 833 - 842  
*Proceedings of the 12th ICAAR, October 15 – 19, 2004 Beijing, China*
- [5] **Binal, A.**  
„A NEW EXPERIMENTAL METHOD AND DEVICE FOR MEASURING ALKALI SILICA GEL PRESSURE IN MORTAR“ Volume I, S. 266 - 271  
*Proceedings of the 12th ICAAR, October 15 – 19, 2004 Beijing, China*
- [6] **Binal, A.**  
„The determination of gel swelling pressure of reactive aggregates by ASGPM device and a new reactive-innocuous aggregate decision chart“  
*Construction and Building Materials 22, S. 1 – 13 2008*
- [7] **Bokern, J. ; Siebel, E.**  
„ALKALI-SILICA REACTION IN GERMANY – TRANSFER OF LABORATORY RESULTS TO PRACTISE“ Volume I S. 490 - 498  
*Proceedings of the 12th ICAAR, October 15 – 19, 2004 Beijing, China*
- [8] **Bonzel, J. ; Krell, J. ; Siebel, E.** „Alkalireaktion im Beton“ S. 57 ff  
*Betontechnische Berichte 1986-1988, Betonverlag, Düsseldorf, 1989*
- [9] **Bühning, A** Diplomarbeit:  
„Entwicklung einer geeigneten Prüfapparatur zur Bestimmung des erforderlichen inneren Druckes für die Erzeugung von Rissen im Betongefüge in Anlehnung an AKR-Schäden“  
*Bauhaus-Universität Weimar, F.A.-Finger-Institut für Baustoffkunde, 2005*
- [10] **Chatterji, S.**  
„An accelerated method for the detection of alkali-aggregate reactivities of aggregates“ S. 647 – 650  
*Cement and Concrete Research 8, 1978*

- [11] **Chatterji, S. ; Jensen, A. D. ; Thaulow, N.**  
„Studies of Alkali-Silica Reaction. Part 4. affect of different alkali salt solutions on expansion“ S. 777 - 783  
*Cement and Concrete Research* 17, 1987
- [12] **Chatterji, S. ; Jensen, A. D. ; Thaulow, N. ; Christensen, P.**  
„Studies of Alkali-Silica Reaction. Part 3. Mechanisms by which NaCl and Ca(OH)<sub>2</sub> affect the reaction“ S. 246 - 255  
*Cement and Concrete Research* 16, 1986
- [13] **Dent Glasser, L. S.**  
„Osmotic pressure and the swelling of gels“ S. 515 - 517  
*Cement and Concrete Research* 9, 1979
- [14] **Deutscher Ausschuss für Stahlbeton**  
„Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton“ *Ausgabe*  
*Feb./2007*  
*Beuth Verlag GmbH, Berlin und Köln*
- [15] **Duncan, M. A. G. ; Swenson, E.G. ; Gillot, J. E. ; Foran, M. R.**  
„Alkali-aggregate reaction in Nova-Scotia – I. Summary of a five-year study“ S. 55 - 69  
*Cement and Concrete Research* 3, 1973
- [16] \* **Dolar - Mantuani, L. M.**  
„UNDULATORY EXTINCTION IN QUARTZ USED FOR IDENTIFYING POTENTIALLY ALKALI-REACTIVE ROCKS“ S. 7 - 10  
*Proceedings of the 5th ICAAR, 1981 Cape Town, USA*
- [17] **Eickenberg, J.**  
„On the problem of silica solubility at high pH“  
*Paul Scherrer Institute Villingen Technical Report* 90-36, 1990
- [18] **Freyburg, E.**  
„Petrographische Aspekte der Alkali-Kieselsäure-Reaktion.“ S. 753 – 764  
*13. ibausil Weimar 1997, Tagungsband 1,*  
*Bauhaus-Universität Weimar, F.A.-Finger-Institut für Baustoffkunde*
- [19] **Freyburg, E. ; Berninger, A.- M.**  
„Bewertung alkalireaktiver Zuschläge außerhalb des Geltungsbereichs der Alkalirichtlinie des DAfStb: Kenntnisstand und neue Erkenntnisse.“ S. 931 – 947  
*14. ibausil Weimar 2000, Tagungsband 1*  
*Bauhaus-Universität Weimar, F.A.-Finger-Institut für Baustoffkunde*
- [20] **Freyburg, E. ; Berninger, A.- M.**  
„Mikroprozesse beim Ablauf der Alkali-Kieselsäure-Reaktion“ S. 2-0719 ff  
*15. Internationale Baustofftagung IBAUSIL 24.-27.09.2003, Tagungsbericht Band 2,*  
*Bauhaus-Universität Weimar, F.A.-Finger-Institut für Baustoffkunde*

- [21] **Freyburg, E. ; Schliffkowitz, D**  
„Bewertung der Alkalireaktivität von Gesteinskörnungen nach petrographischen und mikrostrukturellen Kriterien“  
*16. Internationale Baustofftagung IBAUSIL 20.-23.09.2006, Tagungsbericht Band 2, Bauhaus-Universität Weimar, F.A.-Finger-Institut für Baustoffkunde*
- [22] **Fairbairn, E. M. R. ; Ribeiro, F. L. B. ; Toledo-Filho, R. D. ; Lopes, L. E. ; Silvano, M. M.**  
„SMEARED CRACKING FEM SIMULATION OF ALKALI SILICA EXPANSION USING A NEW MACROSCOPIC COUPLED MODEL” Volume I S. 104 - 114  
*Proceedings of the 12th ICAAR, October 15 – 19, 2004 Beijing, China*
- [23] **Gao, P. ; Wu, S. ; Lin, P. ; Wu, Z.**  
„INFLUENCE OF COMPOSITE MINERAL ADMIXTURES ON EXPANSION AND CRACK DUE TO AAR” Volume II S. 716 - 720  
*Proceedings of the 12th ICAAR, October 15 – 19, 2004 Beijing, China*
- [24] **Hagelia, P.**  
„ORIGIN OF MAP CRACKING IN VIEW OF THE DISTRIBUTION OF AIR VOIDS; STRENGTH AND ASR-GEL“ Volume II, S. 870 - 880  
*Proceedings of the 12th ICAAR, October 15 – 19, 2004 Beijing, China*
- [25] **Hasparyk, N. P. ; Monteiro, P.J.M. ; Carasek, H.**  
„Effect of Silica Fume and Rice Husk Ash on Alkali-Silica Reaction“ S. 486 - 492  
*ACI Materials Journal, Ausgabe 7 – 8/2000*
- [26] **Helmuth, R. ; Stark, D. ; Diamond, S.**  
„Alkali-Silica Reactivity: An Overview of Research“  
*Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington DC 1993*
- [27] **Hill, S.** Dissertation:  
„Zur direkten Beurteilung der Alkaliempfindlichkeit präkambrischer Grauwacken aus der Lausitz anhand deren Kieselsäure- und Aluminiumlöseverhalten“  
*Brandenburgische Technische Universität Cottbus, 2004*
- [28] **Hou, X. ; Struble, L. J. ; Kirkpatrick, J.**  
„Formation of ASR gel and the roles of C-S-H and portlandite“ S. 1683 - 1696  
*Cement and Concrete Research 34, 2004*
- [29] **Hunger, K.-J. ; Hill, S. ; Wollgam, H.**  
„Alkalibeständige Betone – mit Grauwacken aus der Lausitz“ S. 1-0969 ff  
*14. Internationale Baustofftagung IBAUSIL 2000, Tagungsbericht Band 1, Bauhaus-Universität Weimar, F.A.-Finger-Institut für Baustoffkunde*
- [30] \* **Jones, F. E. ; Tarleton, R. D.**  
„Reactions between aggregates and cement. Part V and Part VI”  
*National Building Studies Research Paper No. 25, DSIR/BRS, HMSO, London, 1958*



- [31] **Katayama, T. ; Sommer, H.**  
„Screening carbonate aggregates for alkali-reactivity“  
*16. Internationale Baustofftagung IBAUSIL 20.-23.09.2006, Tagungsbericht Band 2, Bauhaus-Universität Weimar, F.A.-Finger-Institut für Baustoffkunde*
- [32] **Kawamura, M. ; Fuwa, H.**  
„Effects of lithium salts on ASR gel composition and expansion of mortars“ S. 913 - 919  
*Cement and Concrete Research 33, 2003*
- [33] **Kawamura, M. ; Iwahori, K.**  
„ASR gel compositions and expansive pressure in mortars under restraint“ S. 47 - 56  
*Cement & Concrete Composites 26, 2004*
- [34] **Kawamura, M. ; Iwahori, K.**  
„SOME THEORETICAL CONSIDERATIONS ON EXPANSIVE PRESSURE OF ASR GEL“  
Volume I S. 135 - 142  
*Proceedings of the 12th ICAAR, October 15 – 19, 2004 Beijing, China*
- [35] \* **Knudsen, T.**  
„A CONTINUOUS, QUICK METHOD OF CHARACTERIZATION OF THE ALKALI-SILICA REACTIVITY OF AGGREGATES“ S. 289 - 293  
*Proceedings of the 7th ICAAR, 1986 Ottawa, Canada*
- [36] **Krull, Th.** Studienarbeit:  
„Entwicklung einer Quellform für Messungen von Quellmaß und Quellkraft von synthetischen Alkali-Kieselsäure-Gelen bei stetiger Wasserzufuhr“  
*Bauhaus-Universität Weimar, F.A.-Finger-Institut für Baustoffkunde, 2004*
- [37] **Krull, Th.** Diplomarbeit:  
„Untersuchungen zum Quellverhalten synthetischer Alkali-Kieselsäure-Gele in Abhängigkeit ihrer chemischen Zusammensetzung“  
*Bauhaus-Universität Weimar, F.A.-Finger-Institut für Baustoffkunde, 2005*
- [38] **Kuhlmann, J. ; Lenzner, D. ; Ludwig, U. ; Zitzen, P.**  
„Eine einfache Methode zur Messung von Expansionsdrücken“ S. 526 - 530  
*ZKG INTERNATIONAL, 28. Jahrgang Nr.12/1975*
- [39] **Lai-bao, M. ; Dou-you, L. ; Min, D. ; Ming-Shu, T.**  
„EXPANSION OF SILICEOUS AGGREGATE IN LiOH SOLUTION“ Volume I, S. 399 - 406  
*Proceedings of the 12th ICAAR, October 15 – 19, 2004 Beijing, China*
- [40] **Limprecht, J.** Diplomarbeit:  
„Untersuchungen zur Gelzusammensetzung und zu Gefügeschäden an Betonbalken mit verschiedenen AKR-empfindlichen Gesteinen bei unterschiedlichen Lagerungsarten“  
*Bauhaus-Universität Weimar, F.A.-Finger-Institut für Baustoffkunde, 2004*
- [41] **Locher, F. - W. ; Sprung, S.**  
„Einflüsse auf die Alkali-Kieselsäure-Reaktion im Beton“ S. 162 - 169  
*ZKG INTERNATIONAL, 28. Jahrgang Nr.4/1975*

- [42] **Locher, F. - W. ; Sprung, S.**  
„Ursache und Wirkungsweise der Alkalireaktion“ S. 303 - 306  
*Fachzeitschrift Beton, 23. Jahrgang Nr.7/1973*
- [43] **Locher, F. - W. ; Sprung, S.**  
„Ursache und Wirkungsweise der Alkalireaktion“ S. 349 - 353  
*Fachzeitschrift Beton, 23. Jahrgang Nr.8/1973*
- [44] **Mang, H. ; Hofstetter, G.**  
„Festigkeitslehre“ S. 99ff  
*Springer-Verlag, Wien New York 2000*
- [45] **Mansfeld, Th.**  
„Untersuchungen zum Quelldruckverhalten von synthetischen Alkali-Kieselsäure-Gelen“ S. 131 - 138  
*Thesis, Wissenschaftliche Zeitschrift der Bauhaus-Universität Weimar , Heft Nr.5/6, 2001*
- [46] **Mansfeld, Th.**  
„Untersuchungen zu den Quelltheorien und des Mechanismus der AKR“  
*16. Internationale Baustofftagung IBAUSIL 20.-23.09.2006, Tagungsbericht Band 2, Bauhaus-Universität Weimar, F.A.-Finger-Institut für Baustoffkunde*
- [47] **Münchberg, S.** Studienarbeit:  
„Weiterführende Untersuchungen zum AKR-Schnelltest der LMPA Magdeburg“  
*Bauhaus-Universität Weimar, F.A.-Finger-Institut für Baustoffkunde, 2004*
- [48] **Mulenga, D.** Dissertation:  
„Zum Sulfatangriff auf Beton und Mörtel einschließlich der Thaumasitbildung“  
*Bauhaus-Universität Weimar, F.A.-Finger-Institut für Baustoffkunde, 2002*
- [49] **Multon, S. ; Seignol, J. - F. ; Toutlemonde, F.**  
„EFFECTS OF LATE WATER SUPPLY ON ASR PROGRESS IN DAMAGED STRUCTURES“ Volume II, S. 754 - 763  
*Proceedings of the 12th ICAAR, October 15 – 19, 2004 Beijing, China*
- [50] \* **Nishibayashi, S. ; Yamura, K. ; Matsushita, H.**  
„A RAPID METHOD OF DETERMINING THE ALKALI-AGGREGATE REACTION IN CONCRETE BY AUTOCLAVE.“ S. 299 - 303  
*Proceedings of the 7th ICAAR, 1986 Ottawa, Canada*
- [51] **Oberholster, R. ; Davies, G.**  
„An accelerated method for testing the potential alkali reactivity of siliceous aggregates“ S. 181 -189  
*Cement and Concrete Research 16, 1986*
- [52] **Öttl, Chr.** Dissertation:  
„Die schädigende Alkalireaktion von gebrochenen Oberrhein-Gesteinskörnungen im Beton“  
*Otto-Graf-Institut, Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart, 2004*

- [53] **Philipp, O. ; Eifert, K.**  
Bestimmung der Alkalireaktivität von Kiesen und Splitten für die Betonherstellung  
*Betonwerk+Fertigteiltechnik* S. 6-19 Heft 10/2004
- [54] **Powers, T.C. ; Steinour, H.H.**  
“An interpretation of some published researches on the alkali–aggregate reaction: Part 1.  
The chemical reactions and mechanisms of expansion.”  
*J. Am. Concr. Inst.* 51 (1955), pp. 497–516.; p. 785
- [55] **Poyet, S. ; Sellier, A. ; Capra, B. ; Foray, G. ; Torrenti, J. - M. ; Cognon, H. ; Bourdarot, E.**  
„MODELLING OF ALKALI-SILIKA REACTION IN CONCRETE, PART 2:  
INFLUENCE OF WATER ON ASR” Volume I S. 185 - 189  
*Proceedings of the 12th ICAAR, October 15 – 19, 2004 Beijing, China*
- [56] **Poyet, S. ; Sellier, A. ; Capra, B. ; Foray, G. ; Torrenti, J. - M. ; Cognon, H. ; Bourdarot, E.**  
„MODELLING OF ALKALI-SILIKA REACTION IN CONCRETE, PART 3:  
STRUCTURAL EFFECTS INDUCED BY ASR” Volume I S. 191 - 197  
*Proceedings of the 12th ICAAR, October 15 – 19, 2004 Beijing, China*
- [57] **Schäfer, E.**  
Beitrag zum 41. Forschungskolloquium des DAfStb vom 11.-12.07.2002:  
„Alkalität der Porenlösung – Alkalibindung durch Zementbestandteile“ S.121 – 133  
[http://www.vdz-online.de/Downloads/41-dafstb/schaefer\\_es.pdf](http://www.vdz-online.de/Downloads/41-dafstb/schaefer_es.pdf)
- [58] **Schäfer, E. ; Meng B.**  
Betontechnische Berichte:„Einfluss von Zement und Zusatzstoffen auf das Alkaliangebot  
für eine Alkali-Kieselsäure-Reaktion“ S.577 – 584  
*Fachzeitschrift Beton, 51. Jahrgang Nr.10/2001 Verlag Bau + Technik GmbH, Düsseldorf*
- [59] **Schäfer, E. ; Sylla, H.- M.**  
„Einfluss der Reaktionen der Zementbestandteile auf den wirksamen Alkaligehalt“ S. 2-  
0745 ff  
*15. Internationale Baustofftagung IBAUSIL 2003, Tagungsbericht Band 2,  
Bauhaus-Universität Weimar, F.A.-Finger-Institut für Baustoffkunde*
- [60] **Schubert, Th.** Studienarbeit:  
„Untersuchungen zum Quellverhalten synthetischer Alkali-Silikat-Gele“  
*Bauhaus-Universität Weimar, F.A.-Finger-Institut für Baustoffkunde, 2002*
- [61] **Schulze, W.**  
„Dispersions-Silikatsysteme“ Band 473, expert verlag, 1995  
Grundlagen –Formulierungen-Problemlösungen)
- [62] **Sideris, K.**  
„Über das Temperatur-Expansionsmaximum bei der Alkali-Kieselsäure-Reaktion“ S. 508 -  
509  
*ZKG INTERNATIONAL, 32. Jahrgang Nr.10/1979*

- [63] **Sprung, S. ; Sylla, H.- M.**  
„Ablauf der Alkali/Kieselsäurereaktion im Beton bei unterschiedlichen Zuschlaggesteinen“  
S. 334 - 345  
*ZKG INTERNATIONAL*, 51. Jahrgang Nr.6/1998
- [64] **Stark, J. ;Freyburg, E. ; Seyfarth, K. ; Gibson, C.**  
„AKR-Prüfverfahren zur Beurteilung von Gesteinskörnungen und projektspezifischen Betonen“ S. 574-581  
*Fachzeitschrift Beton*, 56. Jahrgang Nr.12/2006 Verlag Bau + Technik GmbH, Düsseldorf”
- [65] **Stark, J. ; Seyfarth, K. ; Gibson, C.**  
„Beurteilung der Alkali-Reaktivität von Gesteinskörnungen und AKR-Performance-Prüfung Beton“  
16. Internationale Baustofftagung IBAUSIL 20.-23.09.2006, Tagungsbericht Band 2,  
Bauhaus-Universität Weimar, F.A.-Finger-Institut für Baustoffkunde
- [66] **Stark, J. ; Bellmann, F. ; Gathemann, B. ; Seyfarth, K. ; Gibson, C.**  
„Einfluss alkalihaltiger Taumittel auf die Alkali-Kieselsäure-Reaktion in Betonen für  
Fahrbahndecken und Flugbetriebsflächen“  
*ZKG INTERNATIONAL*, 51. Jahrgang Nr.11/2006
- [67] **Stark, J. ; Freyburg, E. ; Berninger, A.- M. ; Mansfeld, T.**  
„DFG – Abschlussbericht STA 353/21-1 und 21/2“  
Bauhaus-Universität Weimar, F.A.-Finger-Institut für Baustoffkunde, 15.02.2004
- [68] **Stark, J. ; Wicht, B. ;Freyburg, E. ;Seyfarth, K. ;Giebson, C. ;Erfurt, D.**  
„Alkali-Kieselsäure-Reaktion“  
Schriftenreihe des F.A. Finger-Institutes für Baustoffkunde  
Bauhaus-Universität Weimar, F.A.-Finger-Institut für Baustoffkunde, 2008
- [69] **Stark, J. ; Wicht, B.**  
„Dauerhaftigkeit von Beton“ S. 288 ff  
Birkhäuser Verlag, Schweiz, 2001
- [70] **Strauch, F.** Dissertation:  
„Ringplatte und Augenstab“  
*Ingenieur-Archiv O. Brandstetter, Leipzig 1933*
- [71] **Struble, L. ; Diamond, S.**  
„UNSTABLE SWELLING BEHAVIOR OF ALKALI SILICA GELS “ S 611 - 617.  
*Cement and Concrete Research* 11, 1981
- [72] **Tang, M. S. ; Han, S. F. ; Zhen, S. H.**  
„A rapid method for identification of alkali reactivity of aggregate“ S. 417 - 422  
*Cement and Concrete Research* 13, 1983
- [73] **Thaulow, N. ; Jakobsen, U.-H. ; Clark, B.**  
„COMPOSITION OF ALKALI SILICA GEL AND ETTRINGIT IN CONCRETE RAILROAD  
TIES: SEM-EDX AND X-RAY DIFFRACTION ANALYSES “ S. 309 - 318  
*Cement and Concrete Research* 26, 1996

- [74] **Thomas, M. D. A.**  
„THE ROLE OF CALCIUM IN ALKALI-SILICA REACTION “ S. 325 - 337  
*Materials Science of Concrete: The Sydney Diamond Symposium, special volume*  
*The American Ceramic Society, USA 1998*
- [75] **URHAN, S.**  
“Alkali Silica and Pozzolanic Reactions in Concrete”, Part I S. 141-152  
*Cement and Concrete Research 17, 1987*
- [76] **Way, S. J. ; Shayan, A.**  
„SYNTHESIS AND CHARACTERISATION OF CRYSTALLINE ANALOGUES OF ALKALI-  
AGGREGATE REACTION PRODUCTS“ S. 471 - 479  
*Cement and Concrete Research 23, 1993*
- [77] **Wen, Z.**  
„EXPERIMENTAL DEMONSTRATION OF OSMOTIC PRESSURE EXPANSION OF  
A.A.R.” S. 324 - 330  
*Proceedings of the Beijing International Symposium On Cement and Concrete, 4<sup>th</sup>,  
October 27 – 30, 1998 Beijing, China*
- [78] **Wenzel, D.** Studienarbeit:  
„Zugfestigkeit von Betonzuschlag“  
*Bauhaus-Universität Weimar, F.A.-Finger-Institut für Baustoffkunde, 2002*
- [79] **Wieker, W. ; Hübert, C. ; Heidemann, D. ; Ebert, R.**  
„Zur Reaktion von Alkaliverbindungen mit Kieselsäure und Silicaten im Hinblick auf  
betonschädigende Dehnungsreaktionen“ S. 1-0911 ff  
*14. Internationale Baustofftagung IBAUSIL 2000, Tagungsbericht Band 1,  
Bauhaus-Universität Weimar, F.A.-Finger-Institut für Baustoffkunde*
- [80] **Yin, Qi. ; Wen, Z.**  
„STUDY OF EXPANSION MECHANISM OF A.S.R. USING SOL-GEL EXPANSION  
METHOD” Volume I S. 226 - 229  
*Proceedings of the 12th ICAAR, October 15 – 19, 2004 Beijing, China*
- [81] **Zhang, Ch. ; Wang, A. ; Tang, M. ; Wu, B. ; Zhang, N.**  
„Influence of aggregate size and aggregate size grading on ASR expansion“ S. 1393 - 1396  
*Cement and Concrete Research 29, 1999*

\* diese Quellenangaben wurden aus [27] übernommen




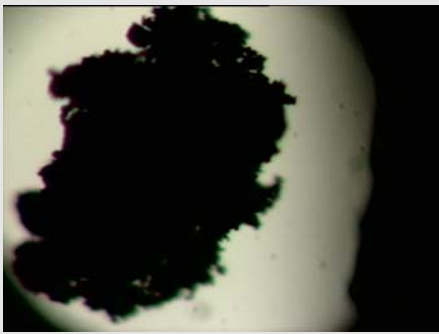

# Anhang

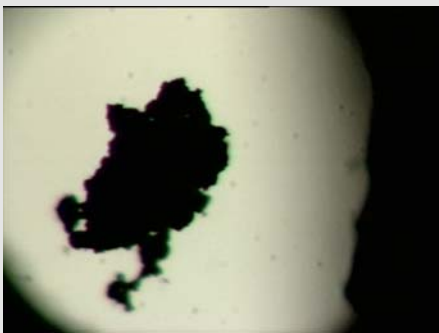
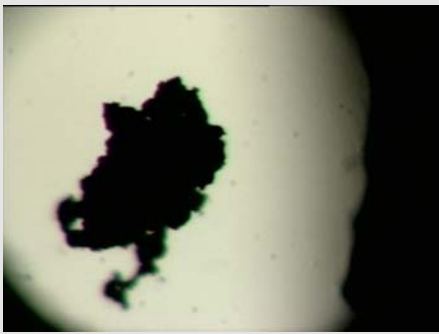

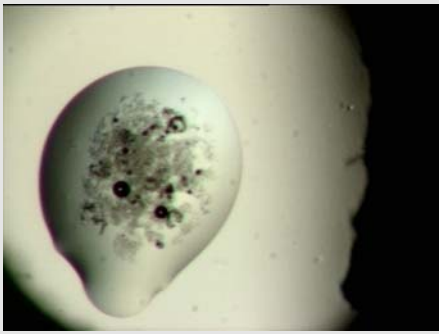
**Tabelle: Zementdatenblatt Prüfzement**

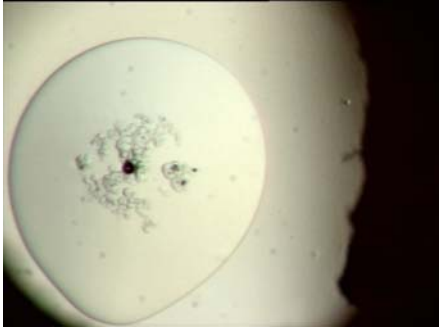
Zement	CEM I 32,5 R
Hersteller	VDZ
Proben-Nr.	Z 245
Liefertermin	24.04.02
Dichte [g/cm³]	3,127
Spez. Oberfläche AO [cm²/g]	3420
Erstarren Beginn EB [h:min]	3:50
Erstarren Ende EE [h:min]	4:50
Wasseranspruch WA [%]	27,3
Raumbeständigkeit [mm]	0,75
Druckfestigkeit RD	
2d [N/mm²]	25,7
7d [N/mm²]	39,1
28d [N/mm²]	48,4
Biegezugfestigkeit RBZ	
2d [N/mm²]	5,9
7d [N/mm²]	7,6
28 [N/mm²]	8,7
Trockenverlust [%]	0,0
Glühverlust [%]	2,4
SiO <sub>2</sub>	20,3
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,1
CaO	59,9
MgO	2,6
MnO	2,6
TiO <sub>2</sub>	0,27
K <sub>2</sub> O	1,62
Na <sub>2</sub> O	0,47
SO <sub>3</sub>	3,3
S	
Cl	0,066
CaO <sub>frei</sub>	2,0
Kalkstandard KST I	88
Silikatmodul SM	2,2
Tonerdemodul TM	1,9
Sulfatisierungsg. SG	
Natriumäquivalent N	1,54
C <sub>3</sub> S	27,2
C <sub>2</sub> S	37,7
C <sub>3</sub> A	10,7
C <sub>4</sub> AF	9,4

## Auswertung Versuch Heiztischmikroskop

Probenbezeichnung: Nr.2 (Na+K+10Ca+SiO<sub>2</sub>)  
 Datum: 10/2001  
 Beleuchtung: Durchlicht  
 Prüfer: Schnell / Wiersdorf für Mansfeld

AUFNAHME	TEMPERATUR	BEMERKUNGEN
	Raum-Temperatur	
Bilder liegen vor	20-200°C	<ul style="list-style-type: none"> <li>– keine Veränderungen</li> <li>– Aufnahmen aller 100 K</li> </ul>
Bilder liegen vor	300-325°C	<ul style="list-style-type: none"> <li>– keine Veränderungen</li> <li>– Aufnahmen aller 25 K</li> </ul>
	350°C	<ul style="list-style-type: none"> <li>– <b>Expansionsbeginn</b></li> <li>– <b>Geringer Expansionsumfang</b></li> </ul>
Bilder liegen vor	375-450°C	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Probe expandiert weiter</li> <li>– Aufnahmen aller 25 K</li> </ul>
	475°C	<ul style="list-style-type: none"> <li>– <b>Expansionsende</b></li> <li>– <b>Beginn der Schwindung 1</b></li> </ul>
Bilder liegen vor	500-690°C	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Probe schwindet weiter</li> <li>– Aufnahmen aller 20 K</li> </ul>

AUFNAHME	TEMPERATUR	BEMERKUNGEN
	700°C	– Ende der Schwindung 1
Bilder liegen vor	710-760°C	– keine Veränderungen – Aufnahmen aller 10 K
	770°C	– Beginn der Schwindung 2
Bilder liegen vor	780-980°C	– Probe schwindet weiter – Aufnahmen aller 10 K
	990°C	– Ende der Schwindung 2 – Erweichungsbeginn – Kanten runden sich
Bilder liegen vor	1000°-1030°C	– Kanten runden sich weiter – Aufnahmen aller 10 K
	1040°C	– vollständige Schmelze

AUFNAHME	TEMPERATUR	BEMERKUNGEN
	1200°C	(Restprobe bei 1200 °C) -- nur zur Info --

FIXPUNKTE	TEMPERATUR
Expansionsbeginn	350 °C
Expansionsende	475 °C
Intervall	125 K
Schwindungsbeginn 1	475 °C
Schwindungsende 1	700 °C
Sinterintervall 1	225 K
Schwindungsbeginn 2	770 °C
Schwindungsende 2	990 °C
Sinterintervall 2	220 K
Erweichungsbeginn	990 °C
Vollständige Schmelze	1040 °C
Schmelzintervall	50 K

Erläuterung	
Expansionsbeginn	erste Größenzunahme unter Beibehaltung der ursprünglichen Form
Expansionsende	größte Abmessung unter Beibehaltung der ursprünglichen Form
Schwindungsbeginn	erste Größenabnahme unter Beibehaltung der ursprünglichen Form
Schwindungsende	kleinste Abmessung unter Beibehaltung der ursprünglichen Form
Sinterintervall	Bereich zwischen Schwindungsbeginn und -ende
Erweichungsbeginn	die Kanten des Körpers beginnen sich zu runden
vollständige Schmelze	Probekörper verliert vollständig ursprüngliche Form
Schmelzintervall	Bereich zwischen Erweichungsbeginn und vollständiger Schmelze

# Innerer Druck für die Erzeugung von Rissen im Gefüge

## Entwicklungsstufe 3 (Spaltung mittels Stahlkeil)

Mörtel-mischung	Probekörper	Abmessungen [mm]	Mörteldeckung [mm]	Probenalter [d]	gemessene Kraft [N]
II	1	Ø=35 / h=100	8,5	5	605,57
II	2	Ø=35 / h=100	8,5	5	437,14
II	3	Ø=35 / h=100	8,5	5	490,13
					Mittelwert: 510,95
					Standardabweichung: 86,12
					entsprechender Geldruck: 5,81
					Standardabw. des Geldruckes: 0,98

Mörtel-mischung	Probekörper	Abmessungen [mm]	Mörteldeckung [mm]	Probenalter [d]	gemessene Kraft [N]
II	1	Ø=46 / h=100	14	5	1078,61
II	2	Ø=46 / h=100	14	5	1142,99
II	3	Ø=46 / h=100	14	5	982,04
					Mittelwert: 1067,88
					Standardabweichung: 81,01
					entsprechender Geldruck: 12,14
					Standardabw. des Geldruckes: 0,92

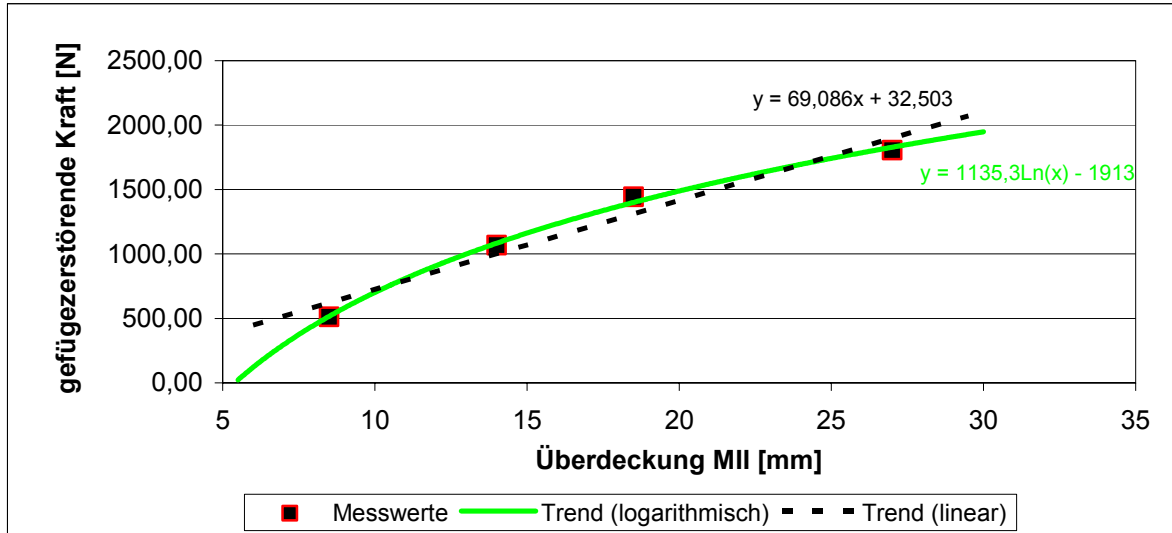
Mörtel-mischung	Probekörper	Abmessungen [mm]	Mörteldeckung [mm]	Probenalter [d]	gemessene Kraft [N]
II	1	Ø=55 / h=100	18,5	5	1430,37
II	2	Ø=55 / h=100	18,5	5	(Belastung: 5N/s!) 1453,97
II	3	Ø=55 / h=100	18,5	5	(Belastung: 5N/s!) 1445,00
					Mittelwert: 1443,11
					Standardabweichung: 11,91
					entsprechender Geldruck: 16,40
					Standardabw. des Geldruckes: 0,14

Mörtel-mischung	Probekörper	Abmessungen [mm]	Mörteldeckung [mm]	Probenalter [d]	gemessene Kraft [N]
II	1	Ø=72 / h=100	27	5	1933,22
II	2	Ø=72 / h=100	27	5	1704,96
II	3	Ø=72 / h=100	27	5	1779,62
					Mittelwert: 1805,93
					Standardabweichung: 116,38
					entsprechender Geldruck: 20,53
					Standardabw. des Geldruckes: 1,32

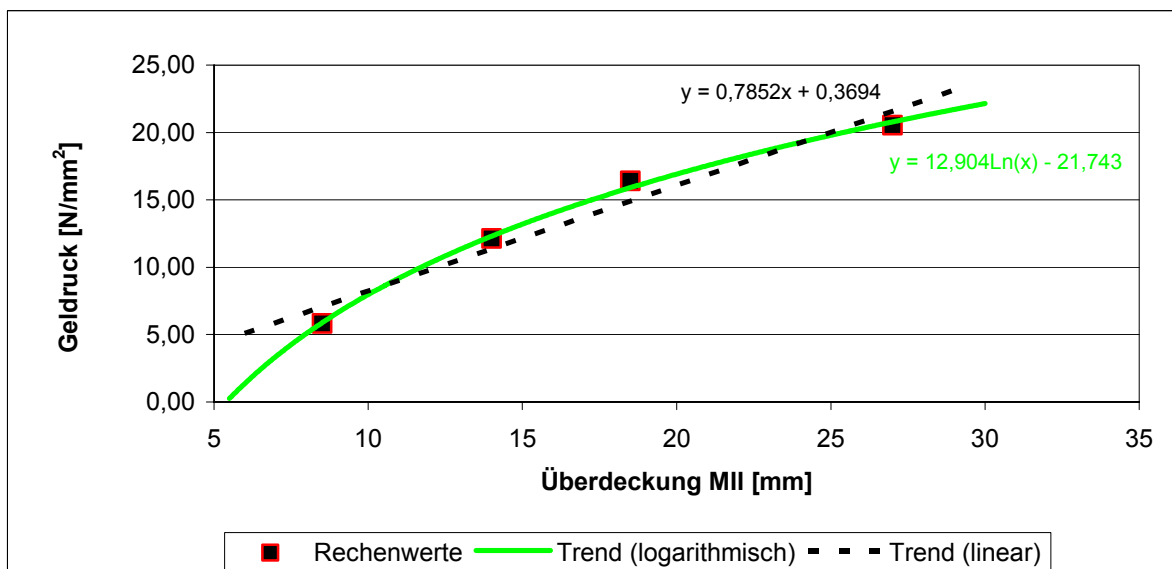
Die blau gekennzeichneten Werte wurden einem Ausreißertest nach GRUBBS unterzogen!



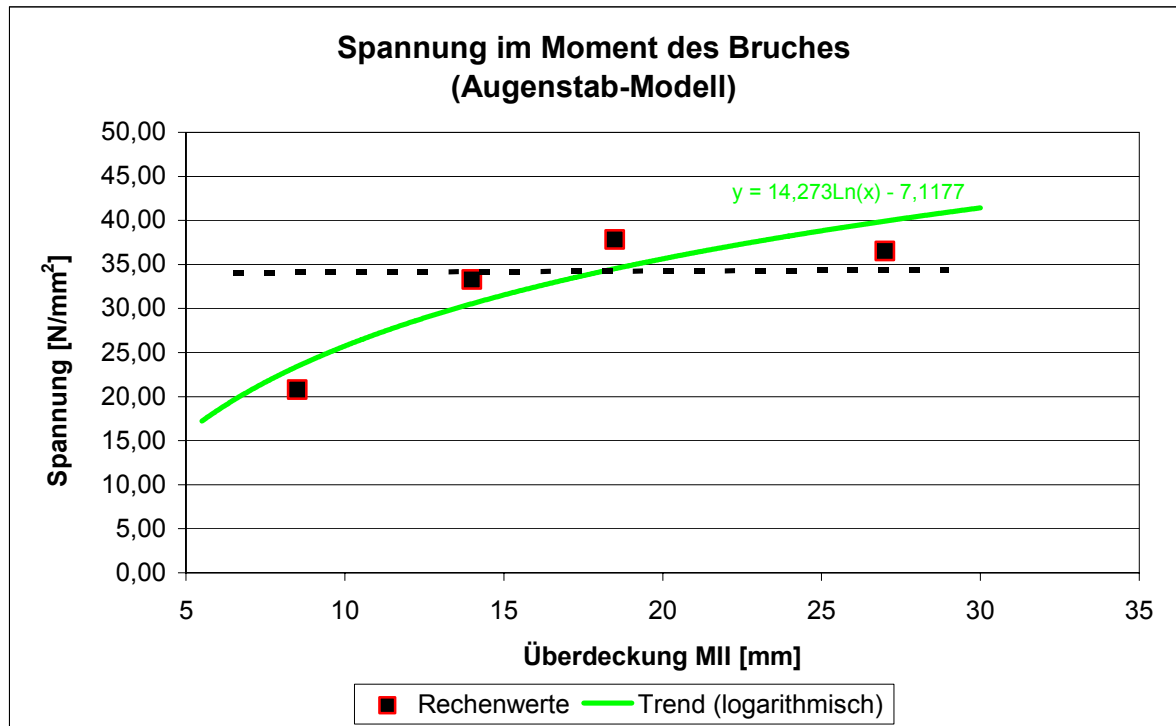
Mörteldeckung MII	8,5	14	18,5	27
Druckkraft $F$ (Mittelwert)	510,95	1067,88	1443,11	1805,93



Mörteldeckung MII	8,5	14	18,5	27
berechneter Geldruck $P_{Gel}$	5,81	12,14	16,40	20,53



Mörteldeckung MII	8,5	14	18,5	27
Spannung im Riss (Augenstab-Modell)	20,80	33,28	37,82	36,53



Mörtel-mischung	Probekörper	Abmessungen [mm]	Mörteldeckung [mm]	Probenalter [d]	gemessene Kraft [N]
III	1	Ø=35 / h=100	8,5	5	1206,19
III	2	Ø=35 / h=100	8,5	5	965,01
III	3	Ø=35 / h=100	8,5	5	1168,81
					Mittelwert: 1113,34
					Standardabweichung: 129,81
					entsprechender Geldruck: 12,65
					Standardabw. des Geldruckes: 1,48

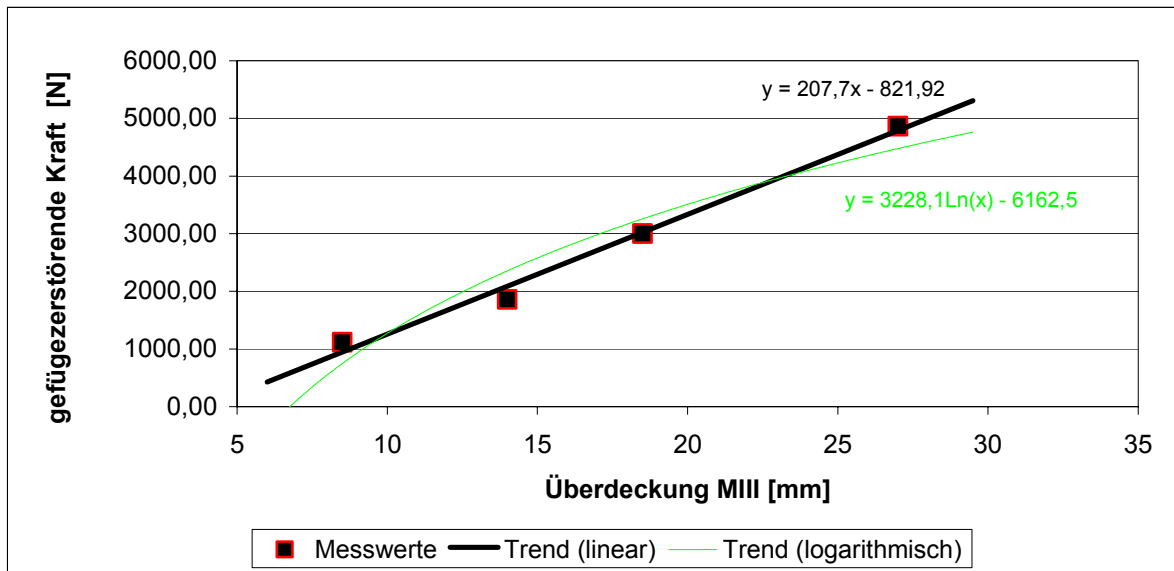
Mörtel-mischung	Probekörper	Abmessungen [mm]	Mörteldeckung [mm]	Probenalter [d]	gemessene Kraft [N]
III	1	Ø=46 / h=100	14	5	1932,42
III	2	Ø=46 / h=100	14	5	2019,43
III	3	Ø=46 / h=100	14	5	1621,76
					Mittelwert: 1857,87
					Standardabweichung: 209,05
					entsprechender Geldruck: 21,12
					Standardabw. des Geldruckes: 2,38

Mörtel-mischung	Probekörper	Abmessungen [mm]	Mörteldeckung [mm]	Probenalter [d]	gemessene Kraft [N]
III	1	Ø=55 / h=100	18,5	5	2967,64
III	2	Ø=55 / h=100	18,5	5	3031,22
III	3	Ø=55 / h=100	18,5	5	3817,32 Korn im Keil!
					Mittelwert: 2999,43
					Standardabweichung: 44,96
					entsprechender Geldruck: 34,09
					Standardabw. des Geldruckes: 0,51

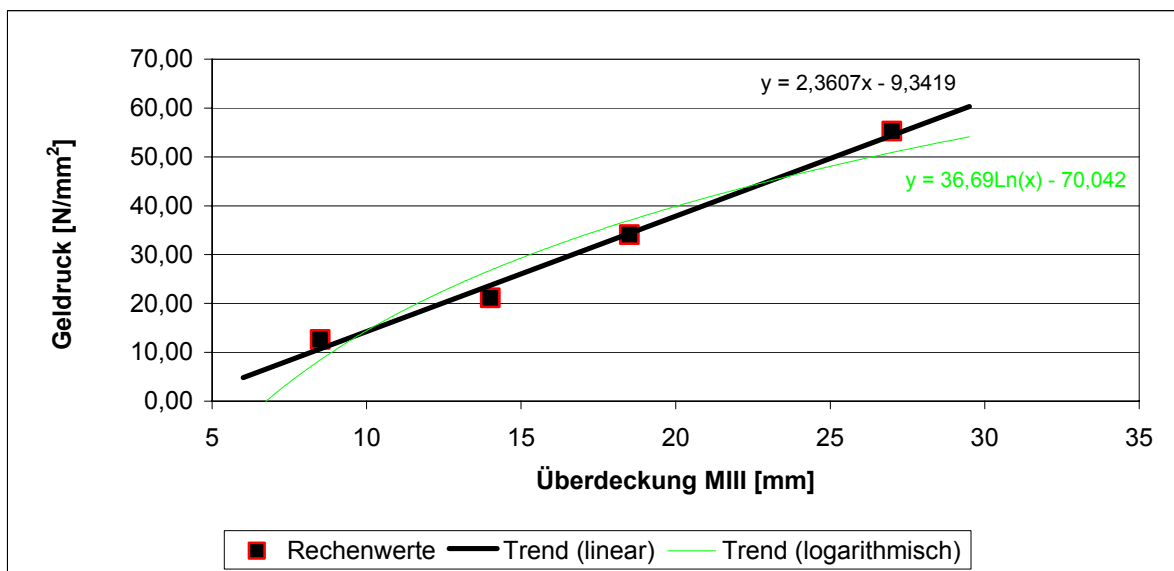
Mörtel-mischung	Probekörper	Abmessungen [mm]	Mörteldeckung [mm]	Probenalter [d]	gemessene Kraft [N]
III	1	Ø=72 / h=100	27	5	4927,36
III	2	Ø=72 / h=100	27	5	5402,28
III	3	Ø=72 / h=100	27	5	4265,38
					Mittelwert: 4865,01
					Standardabweichung: 571,01
					entsprechender Geldruck: 55,30
					Standardabw. des Geldruckes: 6,49

Die blau gekennzeichneten Werte wurden einem Ausreißertest nach GRUBBS unterzogen!

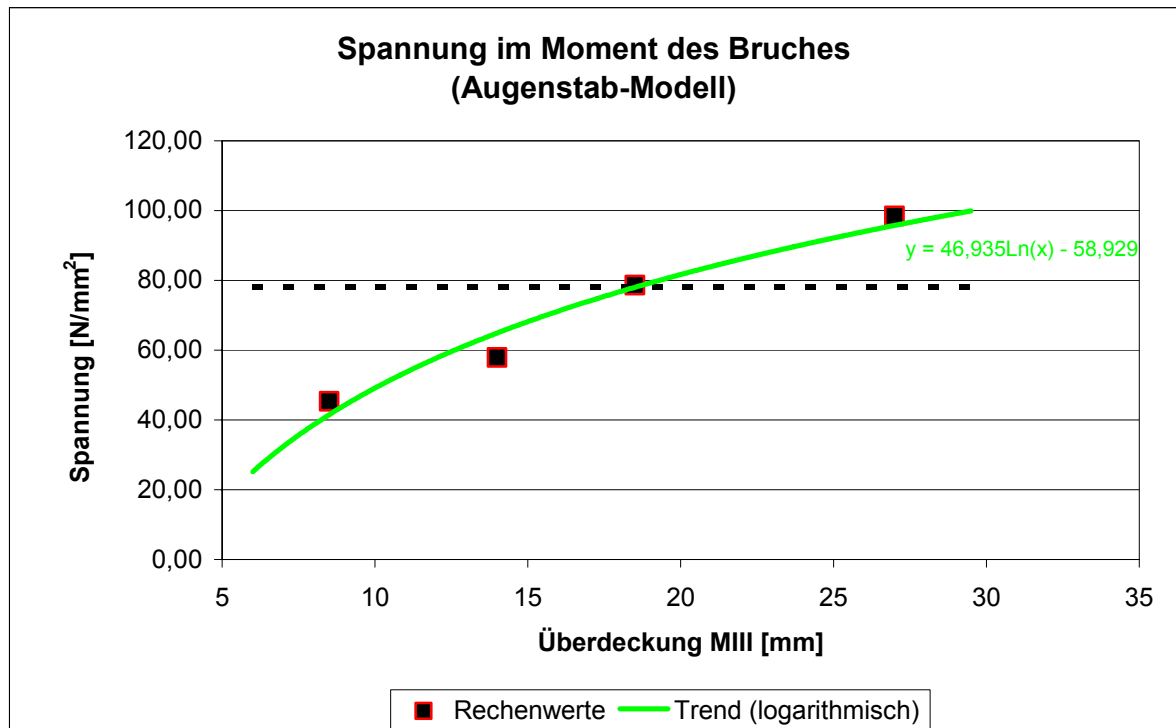
Mörteldeckung MIII	8,5	14	18,5	27
Druckkraft $F$ (Mittelwert)	1113,34	1857,87	2999,43	4865,01



Mörteldeckung MIII	8,5	14	18,5	27
berechneter Geldruck $P_{Gel}$	12,65	21,12	34,09	55,30



Mörteldeckung MIII	8,5	14	18,5	27
Spannung im Riss (Augenstab-Modell)	45,32	57,90	78,61	98,40

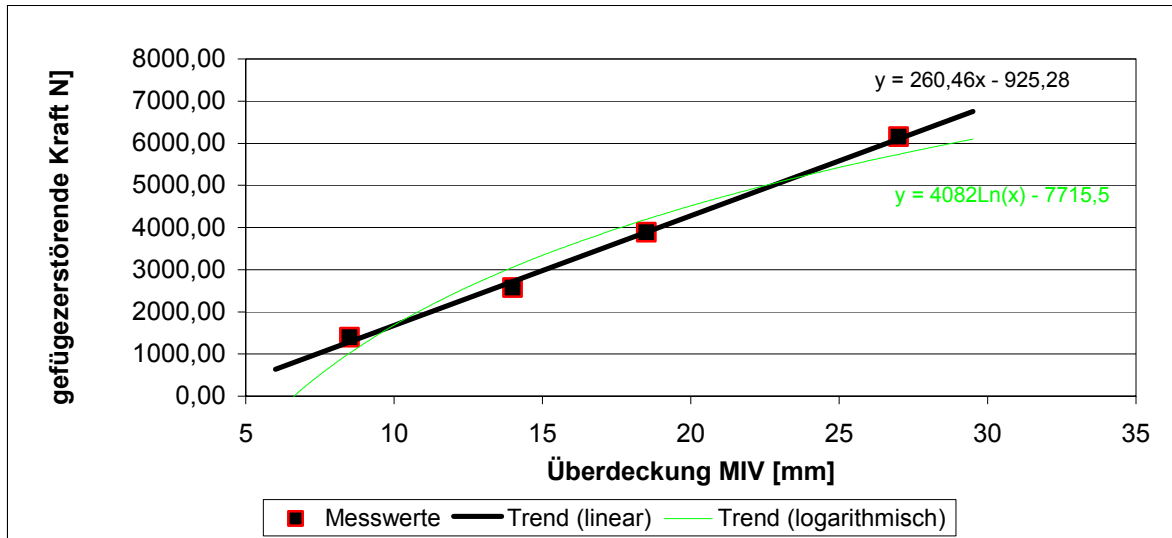




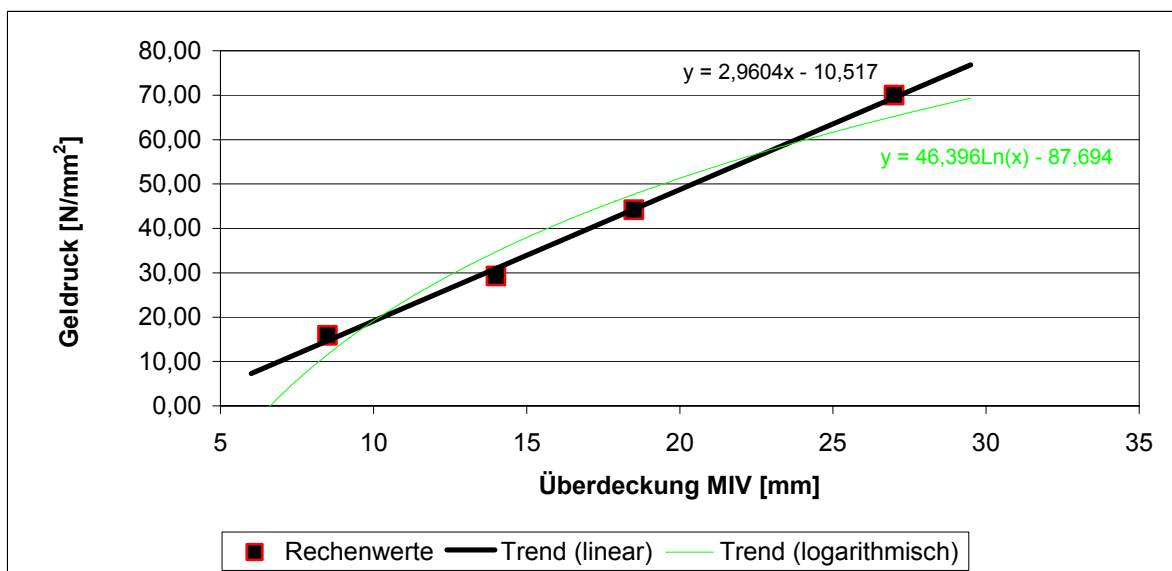
Mörtel-mischung	Probekörper	Abmessungen [mm]	Mörteldeckung [mm]	Probenalter [d]	gemessene Kraft [N]
IV	1	Ø=35 / h=100	8,5	5	1259,27
IV	2	Ø=35 / h=100	8,5	5	1342,80
IV	3	Ø=35 / h=100	8,5	5	1588,66
					Mittelwert: 1396,91
					Standardabweichung: 171,23
					entsprechender Geldruck: 15,88
					Standardabw. des Geldruckes: 1,95
Mörtel-mischung	Probekörper	Abmessungen [mm]	Mörteldeckung [mm]	Probenalter [d]	gemessene Kraft [N]
IV	1	Ø=46 / h=100	14	5	2212,30
IV	2	Ø=46 / h=100	14	5	2435,18
IV	3	Ø=46 / h=100	14	5	3071,62
					Mittelwert: 2573,03
					Standardabweichung: 445,94
					entsprechender Geldruck: 29,24
					Standardabw. des Geldruckes: 5,07
Mörtel-mischung	Probekörper	Abmessungen [mm]	Mörteldeckung [mm]	Probenalter [d]	gemessene Kraft [N]
IV	1	Ø=55 / h=100	18,5	5	3767,04
IV	2	Ø=55 / h=100	18,5	5	3508,86
IV	3	Ø=55 / h=100	18,5	5	4376,40
					Mittelwert: 3884,10
					Standardabweichung: 445,46
					entsprechender Geldruck: 44,15
					Standardabw. des Geldruckes: 5,06
Mörtel-mischung	Probekörper	Abmessungen [mm]	Mörteldeckung [mm]	Probenalter [d]	gemessene Kraft [N]
IV	1	Ø=72 / h=100	27	5	6126,22
IV	2	Ø=72 / h=100	27	5	5500,58
IV	3	Ø=72 / h=100	27	5	6841,54
					Mittelwert: 6156,11
					Standardabweichung: 670,98
					entsprechender Geldruck: 69,97
					Standardabw. des Geldruckes: 7,63

Die blau gekennzeichneten Werte wurden einem Ausreißertest nach GRUBBS unterzogen!

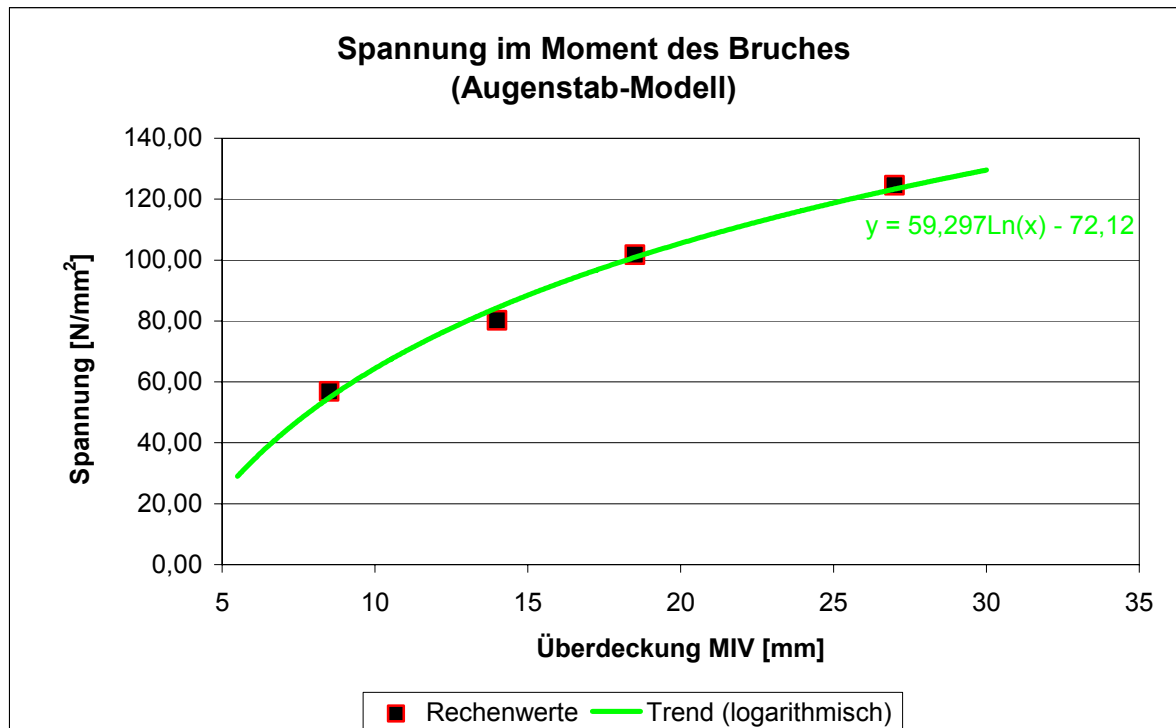
Mörteldeckung MIV	8,5	14	18,5	27
Druckkraft $F$ (Mittelwert)	1396,91	2573,03	3884,10	6156,11



Mörteldeckung MIV	8,5	14	18,5	27
berechneter Geldruck $P_{Gel}$	15,88	29,24	44,15	69,97



Mörteldeckung MIV	8,5	14	18,5	27
Spannung im Riss (Augenstab-Modell)	56,87	80,18	101,79	124,52



### 3. Korrelation OFZ mit Geldruck für die jeweiligen Durchmesser

Ø=35		OFZ (x)	Geldruck (y)	$(x_i - x_M) \cdot (y_i - y_M)$
1	MII	1,11	5,81	5,768
2	MIII	2,34	12,65	0,249
3	MIV	2,95	15,88	3,621
Summe:				9,637
Mittelwerte $x_M, y_M$ :		2,133	11,447	
Standardabw.:		0,937	5,142	
Korrelationskoeffizient R:				1,000
Bestimmtheitsmaß $R^2$ :				0,9999

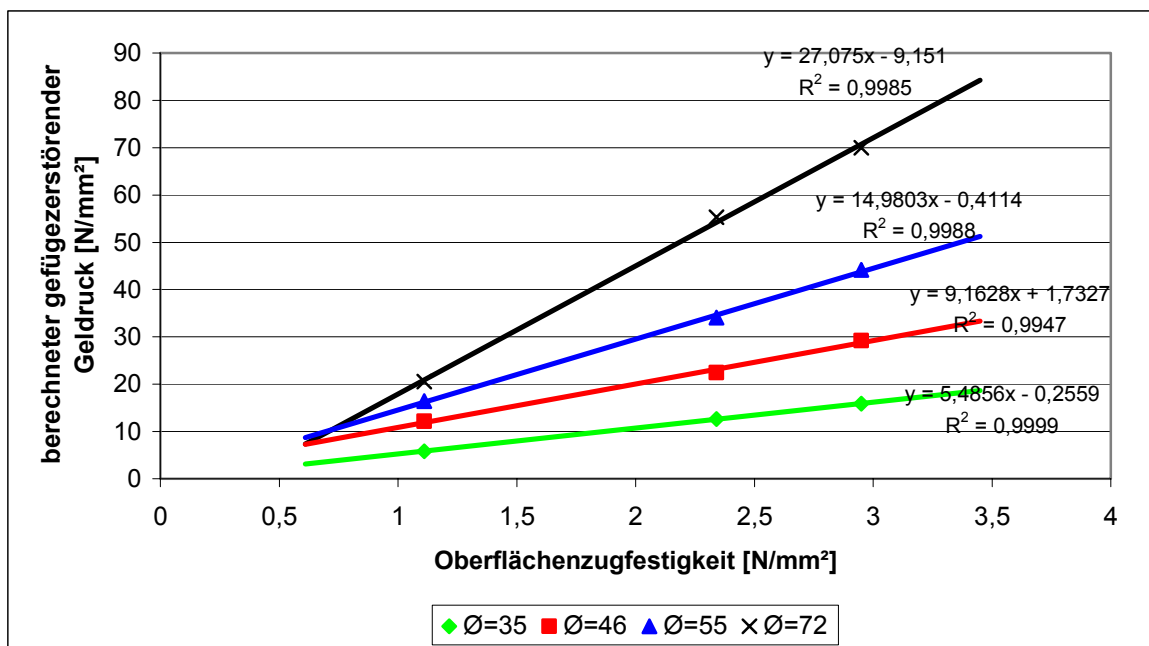
Ø=46		OFZ (x)	Geldruck (y)	$(x_i - x_M) \cdot (y_i - y_M)$
1	MII	1,11	12,14	-0,710
2	MIII	2,34	22,46	2,276
3	MIV	2,95	29,24	14,531
Summe:				16,098
Mittelwerte $x_M, y_M$ :		2,133	21,280	
Standardabw.:		0,937	8,611	
Korrelationskoeffizient R:				0,997
Bestimmtheitsmaß $R^2$ :				0,9947

Ø=55		OFZ (x)	Geldruck (y)	$(x_i - x_M) \cdot (y_i - y_M)$
1	MII	1,11	16,4	-5,069
2	MIII	2,34	34,09	4,680
3	MIV	2,95	44,15	26,708
Summe:				26,318
Mittelwerte $x_M, y_M$ :		2,133	31,547	
Standardabw.:		0,937	14,049	
Korrelationskoeffizient R:				0,999
Bestimmtheitsmaß $R^2$ :				0,9988

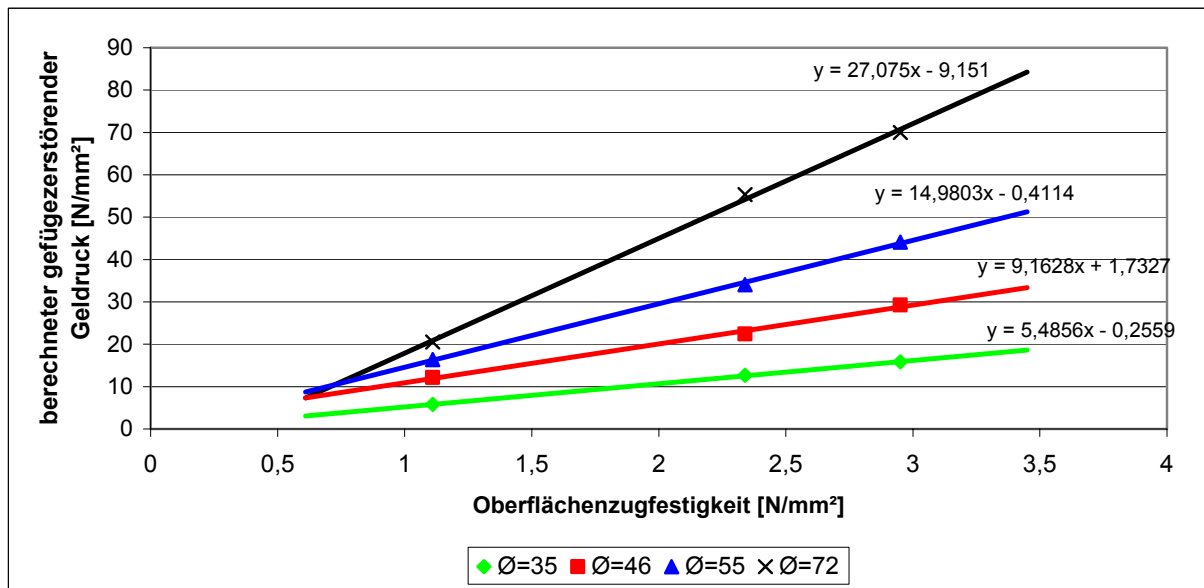
  

Ø=72		OFZ (x)	Geldruck (y)	$(x_i - x_M) \cdot (y_i - y_M)$
1	MII	1,11	20,53	-9,295
2	MIII	2,34	55,33	9,069
3	MIV	2,95	69,97	47,794
Summe:				47,568
Mittelwerte $x_M, y_M$ :		2,133	48,610	
Standardabw.:		0,937	25,396	
Korrelationskoeffizient R:				0,999
Bestimmtheitsmaß $R^2$ :				0,9985



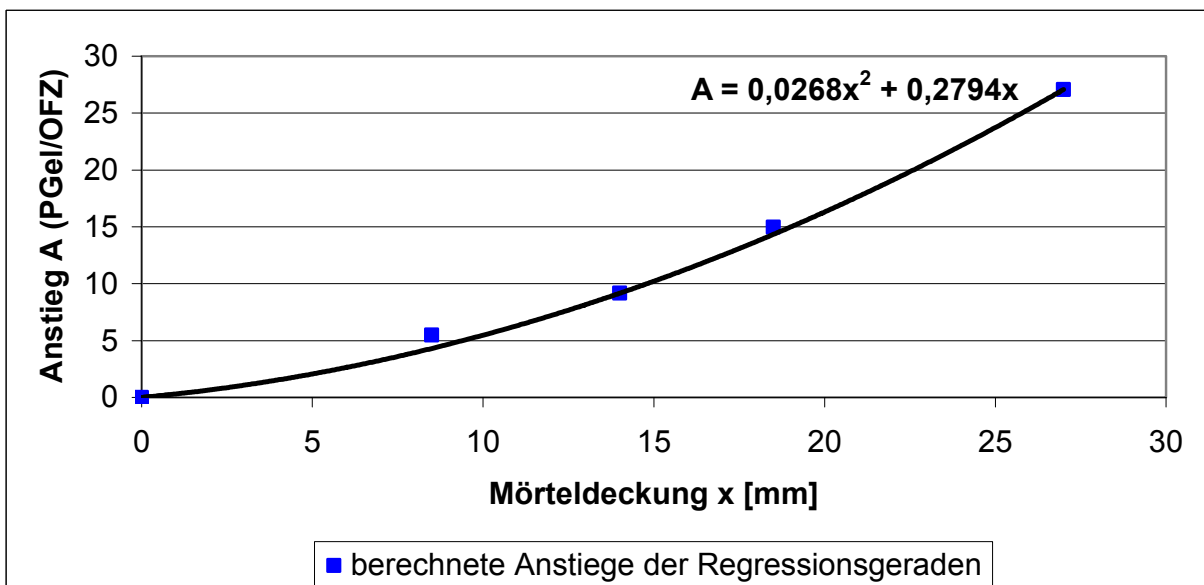
## Hochrechnung für den gefügezerstörenden Geldruck mit Hilfe der OFZ

Anstiege der mörteldeckungsabhängigen Regressionsgeraden:



Mörteldeckung x	Anstieg A ( $P_{\text{Gel}}/\text{OFZ}$ )
0,0	0,0000
8,5	5,4856
14,0	9,1628
18,5	14,9803
27,0	27,0750

Zunahme der Anstiege ( $P_{\text{Gel}}/\text{OFZ}$ ) mit steigender Mörteldeckung:



Für die Bestimmung einer Funktion, welche die Anstiege (P /OFZ) in Abhängigkeit der Gel Mörteldeckung wiedergibt, stellte sich der Ansatz mit einer allgemeinen quadratischen Funktion als der am besten geeignete heraus.

Folgende drei Wertepaare wurden für die Berechnung der Konstanten a, b und c aus der Gleichung  $y = ax^2 + bx + c$  verwendet:  $f(0) = 0$  (da die Kurve durch den Koordinatenursprung gehen sollte)

$$f(14) = 9,1628$$

$$f(27) = 27,075$$

damit ergaben sich drei Gleichungen:

$$0 = c$$

$$9,16282 = a \cdot 14^2 + b \cdot 14 + 0$$

$$27,075 = a \cdot 27^2 + b \cdot 27 + 0$$

und nach Auflösung des Gleichungssystems die Konstanten:

$$c = 0 ; a = 0,026791697 ; b = 0,279401954$$

Gleichung für den Anstieg:

$$y = A = 0,0268x^2 + 0,2794x$$

Die zur Funktion gehörende Kurve stellt eine gute Näherung zu allen Wertepaaren dar und ist im Anhang A 69 abgebildet